

Karstområdet vid
Lummelunds bruk, Gotland
med speciell hänsyn till
Lummelundagrottan

Leif Engh



MEDDELANDEN FRÅN LUNDS UNIVERSITETS GEOGRAFISKA INSTITUTION
AVHANDLINGAR XC

1981

MEDDELANDE FRÅN LUNDS UNIVERSITETS
GEOGRAFISKA INSTITUTION.

Serie Avhandlingar.

- I. *Herman Richter*: Skånes karta från mitten av 1500-talet till omkring 1700. Bidrag till en historisk-kartografisk undersökning. (1929).
- II. *Josef Westin*: Kulturgeografiska studier inom Nätra-, Näske- och Utby-årnas flodområden samt angränsande kusttrakter. (1930).
- III. *Herman Richter* och *Wilhelm Norlind*: Orbis Arctoi Nova et Accurata Delineatio Auctore Andrea Bureo Sueco 1626. (1936).
- IV. *Sven Björnsson*: Sommen-Åsundenområdet. En geomorfologisk studie. (1937).
- V. *Arne Sandell*: Tektonik och morfologi inom dalformationen med omgivande urbergsterräng. (1941).
- VI. *Sven Dahl*: Torna och Bara. Studier i Skånes bebyggelse- och näringsgeografi före 1860. (1942).
- VII. *Karl Erik Bergsten*: Isälvsfält kring norra Vättern. Fysisk-geografiska studier. (1943).
- VIII. *Carl Erik Nordenskjöld*: Morfologiska studier inom övergångsområdet mellan Kalmar slätten och Tjust. (1944).
- IX. *Sven Björnsson*: Blekinge. En studie av det blekingeska kulturlandskapet. (1946).
- X. *Karl Erik Bergsten*: Östergötlands bergslag. En geografisk studie. (1946).
- XI. *Tor Holmquist*: Den halländska vinterfiskehamnsfrågan. (1947).
- XII. *Olof Ångeby*: Landformerna i nordvästra Jämtland och angränsande delar av Nord-Tröndelag. (1947).
- XIII. *Axel Wennberg*: Lantbebyggelsen i nordöstra Östergötland 1600—1875. (1947).
- XIV. *Lars Björning*: Skånes jord- och stenindustri. Dess utveckling, lokalisering och betydelse ur näringsgeografisk synvinkel. (1947).
- XV. *Allan Weinhausen*: Norbergs bergslag samt Gunnilbo och Ramnäs till omkring 1820. Studier i områdets närings- och bebyggelsegeografi. (1947).
- XVI. *Helge Stålberg*: Smålands skogs- och träförädlingsindustrier. En näringsgeografisk studie. (1947).
- XVII. *Folke Lagnert*: Veteodlingen i södra och mellersta Sverige. (1949).
- XVIII. *Yngve Nilsson*: Bygd och näringsliv i norra Värmland. En kulturgeografisk studie. (1950).
- XIX. *Olof Ångeby*: Eversionen i recenta vattenfall. (1951).
- XX. *Karl Erik Bergsten*: Sydsvenska födelseortsfält. (1951).
- XXI. *Folke Lagnert*: Valmanskåren på Skånes landsbygd 1911—1948. (1952).
- XXII. *Olof Nordström*: Relationer mellan bruk och omland i östra Småland 1750—1900. (1952).
- XXIII. *Arvid Bergdahl*: Israndsbildningar i östra Syd- och Mellansverige med särskild hänsyn till åsarna. (1953).
- XXIV. *Sven E. Behrens*: Morfometrisk, morfogenetisk och tektonisk studier av de nordvästskånska urbergsåsarna, särskilt Kullaberg. (1953).
- XXV. *Torsten Hågerstrand*: Innovationsförloppet ur korologisk synpunkt. (1953).
- XXVI. *Gunnhild Weimarek*: Studier över landskapets förändring inom Lönsboda, Örkeneds socken, nordöstra Skåne. (1953).
- XXVII. *Ingemar Larsson*: Structure and Landscape in Western Blekinge, South-east Sweden. (1954).

Karstområdet vid
Lummelunds bruk, Gotland
med speciell hänsyn till
Lummelundagrottan

Leif Engh



MEDDELANDEN FRÅN LUNDS UNIVERSITETS GEOGRAFISKA INSTITUTION
AVHANDLINGAR XC

All text, alla figurer och fotografier i denna publikation är skyddade genom Världskonventionen om upphovsrätt samt genom Bernkonventionen om upphovsrätt.

Avbildning, avfotografering, kopiering eller duplicering av text, figurer eller fotografier får ej göras utan upphovsmannens tillstånd. Undantaget är icke kommersiell publicering vid vetenskaplig institution.

COPYRIGHT © LEIF ENGH 1980.

I avhandlingen ingående kartor över markytan är godkända ur sekretessynpunkt för spridning av Statens Lantmäteriverk 1980.11.10.

Avhandling No XC : ISBN 91 - 7222 - 352 - 9

Svenska Grottor No 3 : ISBN 91 - 86046 - 02 - 0

ISSN 0348 - 2782

Teckningen på omslaget : Del av Droppstengalleriet i Lummelundagrottan. Sven Gunnvall 1979.



Printed in Sweden by

Info - Print, Malmö

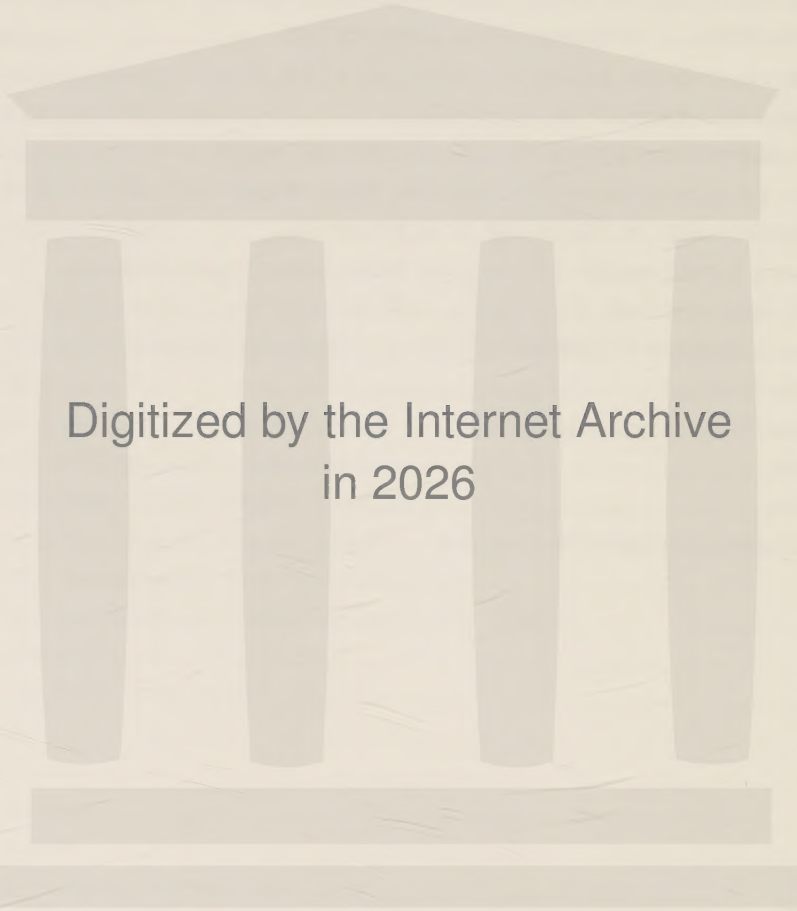
INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD.....	1
1. INLEDNING.....	2
Karst - en definition.....	2
Karstförekomster.....	3
Karstforskningen och speleologin.....	5
Karstforskning och övrig speleologisk verksamhet i Sverige..	8
Föreliggande undersökning.....	9
2. ÖVERSIKTLIG BESKRIVNING AV UNDERSÖKT OMRÅDE.....	11
Klimat.....	11
Geologi.....	13
Vegetation.....	15
Allmän morfologi.....	18
Tidigare arbeten i Lummelunda karstområde.....	18
3. STRANDBILDNINGAR.....	21
Klint.....	21
Strandvallar.....	22
Grottor och strandhak i klinten.....	23
4. KARSTFORMER.....	28
Doliner.....	30
Slukhål.....	37
Källor.....	39
Grottor.....	41
Övriga karstformer.....	43
5. HYDROLOGI.....	46
Metodik.....	46
Lummelundaströmmen.....	47
Slukhål.....	53
Karstkällor.....	59
Samband mellan källor och slukhål.....	65
Vattnets kemiska och fysikaliska egenskaper.....	67
Totalavrinningen.....	68
Grundvattnet.....	70
6. KARSTLANDSKAPETS UTVECKLING - DENUDATIONSBERÄKNINGAR OCH MORFOMETRI....	72
Lösning av kalksten i vatten.....	73
Bestämning av mängden löst kalk i Lummelundaströmmen.....	76
Korrosionsintensiteten beräknad på hydrokemiska analyser....	84
Morfometriska analyser.....	88
Denudationsberäkningar - jämförelse mellan två olika metoder	98
Landskapets framtida utveckling.....	99

LUMMELUNDAGROTTAN

7. INTRODUKTION OCH HISTORIK.....	102
Allmänt om karstgrottor.....	102
Utforskningen av grottan.....	104
Turismen.....	109
8. UNDERSÖKNINGSMETODIK OCH UTRUSTNING.....	115
Kartering.....	116
Specialkonstruerad utrustning och utnyttjade detekteringsmetoder.....	118
Dykning.....	126
Pumpning.....	126
Fotodokumentation.....	127
Sammanställning av metoder för detektering av underjordiska hålrum.....	127
9. GÅNGSYSTEMETS UTBREDNING OCH MORFOLOGI.....	132
Aktiva Systemet.....	135
Fossila Systemet.....	144
Hydrologiska förhållanden samt de ännu utforskade delarna av grottan..	146
10. BERGGRUNDSFAKTORENAS BETYDELSE FÖR GROTTSYSTEMETS UPPBYGGNAD.....	151
Petrologin.....	152
Tektoniken.....	156
Bergmekaniska undersökningar.....	159
11. SPELEOTHEMS (DROPPSTENSBILDNINGAR).....	160
Klassificering av speleothems - förekomster i Sverige.....	161
Fysiska egenskaper hos speleothems.....	164
Hur speleothems av kalciumkarbonat bildas.....	166
Stalaktiter.....	167
Stalagmiter och kolonner.....	172
Draperier.....	173
Flowstone.....	176
Heliktiter.....	179
Bergmjölk.....	181
Subakvatiska bildningar.....	183
Tillväxthastigheten - speleothems som geologiska klockor....	186
12. LÖSA AVLAGRINGAR.....	189
Metodik.....	190
Alloktona avlagringar.....	191
Autoktona avlagringar.....	197
De lösa avlagringarnas utbredning i grottan.....	199
13. SPELEOKLIMAT.....	202
Människans utnyttjande av speleoklimat.....	205

Luftcirkulationen i Lummelundagrottan.....	207
Luftfuktigheten.....	209
Temperaturen.....	212
Sammanfattning över Lummelundagrottans klimat.....	220
14. SPELEOBIOLOGI.....	223
Faunan.....	224
Floran.....	231
15. KARSTGROTTOR - UPPKOMST OCH UTVECKLING.....	232
Hur karstgrottor bildas - förslag till klassificering.....	232
Hur Lummelundagrottan uppkommit.....	243
Hypoteser kring utformningen av vissa partier i grottan.....	247
Aldern på Lummelundagrottan och dess framtida utveckling....	249
16. SAMMANFATTANDE DISKUSSION - SLUTSATSER.....	255
De stora problemställningarna inom karstforskningen.....	255
Kemisk denudation.....	256
Karstmorfologi - klimat.....	256
Karsthydrologi.....	258
Karstområdet Lummelunds bruk i sammandrag.....	258
17. SUMMARY.....	261
BILAGOR.....	267
REFERERAD LITTERATUR.....	274



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41553210_0006

FÖRORD

Våren 1977 fick jag i uppdrag av Statens Naturvårdsverk, via länsstyrelsens naturvårdsenhet på Gotland, att göra en utredning om karstområdet vid Lummelunds bruk. För ändamålet avsatte SNV 25 000 kr. Under fältarbetet insåg jag att området var väl värt en vidareundersökning utöver vad ovanstående uppdrag omfattade. Fältarbetet utvidgades därför till en högre ambitionsnivå där resultatet skulle utgöras av en doktorsavhandling i ämnet naturgeografi.

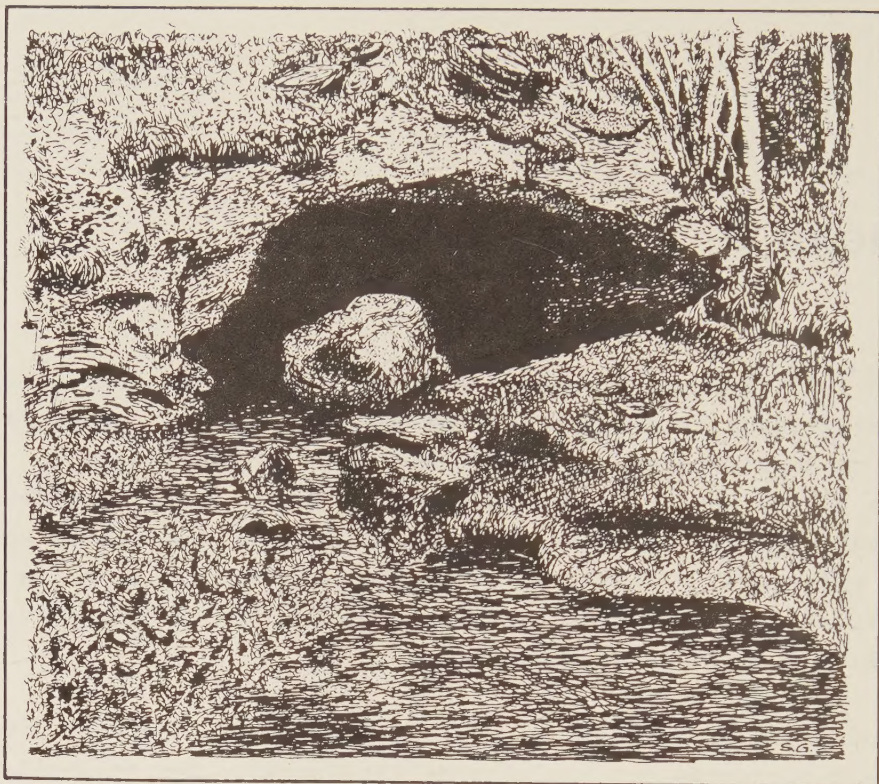
Avhandlingen är i första hand ett vetenskapligt dokument över Lummelundagrottan och tillhörande karstområde. Den är emellertid också skriven så att den ska kunna läsas av personer utan direkta förkunskaper. Det är därför min förhoppning att boken skall tjäna som kunskapskälla för de som är intresserade av karst och grottor i allmänhet och Lummelundagrottan i synnerhet.

Denna avhandling har tillkommit med hjälp av ett stort antal personer. Jag vill här varmt tacka alla mina vänner i Sveriges Speleologförbund, på Gotland och på Naturgeografiska institutionen i Lund för all hjälp. En förteckning över alla de jag riktar mitt tack till finns i bilaga 1.

Lund i november 1980

Naturgeografiska institutionen

LEIF ENGH



Lummelundagrottans mynning i klinten.

Teckning av Sven Gunnvall, 1979.

I. INLEDNING

KARST - EN DEFINITION

"Karst är en landskapstyp, i vilken underjordisk vattenföring i fasta, utlösningssbara bergarter (förkarstningsbara mineral) förekommer, och i vilken vissa ovan- och underjordiska former som är karaktäristiska för landskapet (karstfenomen) kan upp-

träda". Citatet är hämtat från Tell 1973 och 1976 och utgör UIS (Internationella Speleolog-Unionen) definition av karst. Definitionerna av karst är dock nästan lika många som de mera betydande författarna i ämnet. Helldén (1974) har sammanfattat karstforskarna Jennings och Sweetings definitioner på följande sätt "Karst är ett sammanfattande begrepp för de landformer och det speciella dräneringsmönster som kan utbildas, huvudsakligen genom korrosion, i karbonathaltig berggrund". Denna definition begränsar karstbildningen till kalksten och dolomit vilket får anses alltför snävt. Välutbildade landskap med klassiska karstformer finns även i andra bergarter, främst då gips och salt. Bl a är världens största koncentration av grottsystem, som finns i västra Sovjetunionen, utbildad i gips (Jakucs & Mezosi 1977).

Under senare delen av 1970-talet har allt fler artiklar behandlat pseudokarst, d v s karstformer i andra bergarter än de som normalt anses som lösliga av vatten. Så beskriver t ex Kasting (1977) karrenbildningar i granit. Beck (1980) föreslår därför följande definition av karst: "A distinctive assemblage of landforms arising from weathering reactions in which rock of any type is dominantly removed in aqueous solution".

Självva ordet karst härstammar från det slaviska ordet kras. Ordet är troligen av preindoeuropeiskt ursprung och betyder naken stenig mark (Helldén 1974), oftast ur odlingssynpunkt mindre lämplig mark. I bl a Jugoslavien och Tjeckoslovakien har stora karstområden namngivits med ordet karst, t ex Moravský Kras.

KARSTFÖREKOMSTER

Karstformer förekommer i de flesta av jordens länder och kan ofta täcka mycket stora arealer.

Enligt Baláz (1977) är det känt att minst 4% av jordens landyta är karstifierad. Men eftersom 13% av landytan utgöres av förkarstningsbara bergarter (Kopper & Young 1976) är det rim-

ligt att anta att den karstifierade delen av landytan är betydligt större än 4%.

Vissa länder är starkt karstifierade, t ex Frankrike (40%) och Jamaica (66%). Europa som helhet består till 13,5% av karstlandskap (Baláz 1977). Det till ytan största enskilda förekomsterna av karst finns i Kina, där för övrigt cirka 15% av landytan utgöres av karst (Sweeting 1978).

I internationell jämförelse är Sveriges kända karstförekomster små i förhållande till landets yta. Det senaste årtiondets undersökningar har visserligen resulterat i att de kända karstförekomsternas antal och sammanlagda areal har mångdubblats, men de är fortfarande relativt få och små och omfattar mindre än 1% av landytan.

Egna undersökningar av kalkstensområden från Skåne till nordligaste Lappland har visat att synlig karstifiering under följande förutsättningar förekommer överallt där berggrunden består av kalksten:

1. Att kalken är tillräckligt ren, d v s att inslaget av annat material ej är för stort. Hur stort det procentuella inslaget av annat material skall vara för att hindra karstifiering har inte gått att bestämma entydigt. Andra faktorer, som det främmande materialets sammansättning och fördelning samt kalkstenens struktur, har också visat sig vara av betydelse.
2. Att berggrunden ej är täckt av alltför mäktiga lösa avlagringar. Detta gäller framförallt där den dominerande karstformen utgöres av sprickkarren som t ex på Öland och Gotland där det räcker med ett jordtäcke på cirka 0,5 m för att dölja karstsprickorna. Dolinformerna som har väsentligt större yta än karrenformerna, verkar vara betydligt lättare att spåra i markytan även om de överlagrande sedimenten har en mäktighet på flera meter. I Bjurälvens karstlandskap, i NV Jämtland, har t ex doliner utbildats i upp till 33 m mäktiga issjösediment (sedimenten spolas ner i underjorden så att stora rastrattar uppstår =

alluvialdoliner).

3. Att berggrunden ej är täckt av lösa avlagringar med hög kalkhalt. Om kalkhaltiga sediment innehåller större mängder finkornigt material (silt och finare) eller är av betydande mäktighet så att nederbördsvattnets passage från markytan till berggrunden kan räknas i dygn kommer vattnet att mättas på kalk varvid berggrunden kommer att förbli opåverkad (detta förhållande behandlas mera detaljerat i avsnittet "Landskapets framtida utveckling").
4. Att inte någon annan formbildande process dominerar över karstvittringen. I Sverige är det framförallt frostvittringen och sluttningsprocesser som förhindrar uppkomsten av eller utplånar karstformer. I fjällen har jag t ex funnit att ytliga karstformer ytterst sällan uppträder på över 1 000 m höjd, gränsen tycks ligga mellan 800 och 1 000 m. Frostvittring kan dock dominera även under 800 m, kalkens sammansättning, grad av metamorfisering samt struktur förefaller här att vara avgörande för vilken vittringsprocess som morfologiskt kommer att dominera.

KARSTFORSKNINGEN OCH SPELEOLOGIN

Karstforskningen som vetenskap är känd från mitten av 1800-talet, medan själva grottforskningen har sina rötter ytterligare 100 år bakåt i tiden. Såväl karstforskningen som grottforskningen har sitt ursprung i Centraleuropa (Sweeting 1972).

Karstforskningen hänföres av tradition till geografiämnet och flertalet av de nu verksamma karstforskarna är knutna till geografiska institutioner, men på flera håll i världen finns det inrättat speciella professurer i ämnet och några länder har dessutom särskilda karstforskningsinstitut.

Då termen karst huvudsakligen omfattar former och processer i utlösingsbar berggrund har begreppet blivit för snävt för att kunna användas i samband med all den forskning som idag bedrivs kring karstföreteelser. Vid kongresser och symposier

och i bibliografier användes därför istället speleologi som en sammanfattande beteckning på allt som berör grottor och karst. Speleologi, som egentligen betyder läran om grottor, har därmed kommit att omfatta en mängd olika forskningsgrenar av så skilda slag som t ex arkeologi, vulkanologi, kemi och glaciologi. I fig. 1 har ett försök gjorts att spalta upp speleologin i de olika forskningsgrenar som ingår. Som grund till uppdelningen ligger indelningar i förekommande speleologiska bibliografier samt indelningen i symposie- och arbetsgrupper vid 6:e, 7:e och 8:e internationella speleologiska kongresserna. Fig. 2 visar ett tidigare försök att illustrera begreppet speleologi.

För att belysa speleologins betydelse för forskningsgrenar som normalt inte förknippas med karstforskning kan arkeologin nämnas. Cirka 95% av alla fynd av mänskliga fossil äldre än 30 000 år har påträffats i karstterräng och då främst i grottor (Kopper & Young 1976).

Nu omfattar termen speleologi inte enbart forskning, i begreppet ingår även grottsport och speleoturism. Forskarna och sportsutövarna samarbetar ofta och båda tillför kunskaper till speleologin medan turismen enbart tar del av resultaten.

Både sporten och turismen är huvudsakligen inriktade på själva grottorna men det blir allt vanligare att t ex hela karstlandskap blir föremål för turism och även om själva sportsutövandet sker i grottorna så har utövarna för det mesta intresse av speleologin som helhet.

Forskningen och sporten kan sägas vara starkt integrerad då det i många fall är svårt att ägna sig åt vetenskapligt arbete i grottor utan att komma in på sporten och den teknik som utvecklas där. Många gånger är det sportutövarna som banar väg för vetenskapen, men det är också vanligt att vetenskapsmännen själva utövar sporten, många gånger är det dessutom nödvändigt. En intressant sak i sammanhanget är vad det ömsesidiga utbytet fört med sig. På samma sätt som forskare blir intresserade av sporten har många sportspeleologer blivit intresserade av forskning. Få vetenskaper kan därför uppvisa så många amatörforskare som speleologin. År 1978 publicerades t ex 5 000 spel-

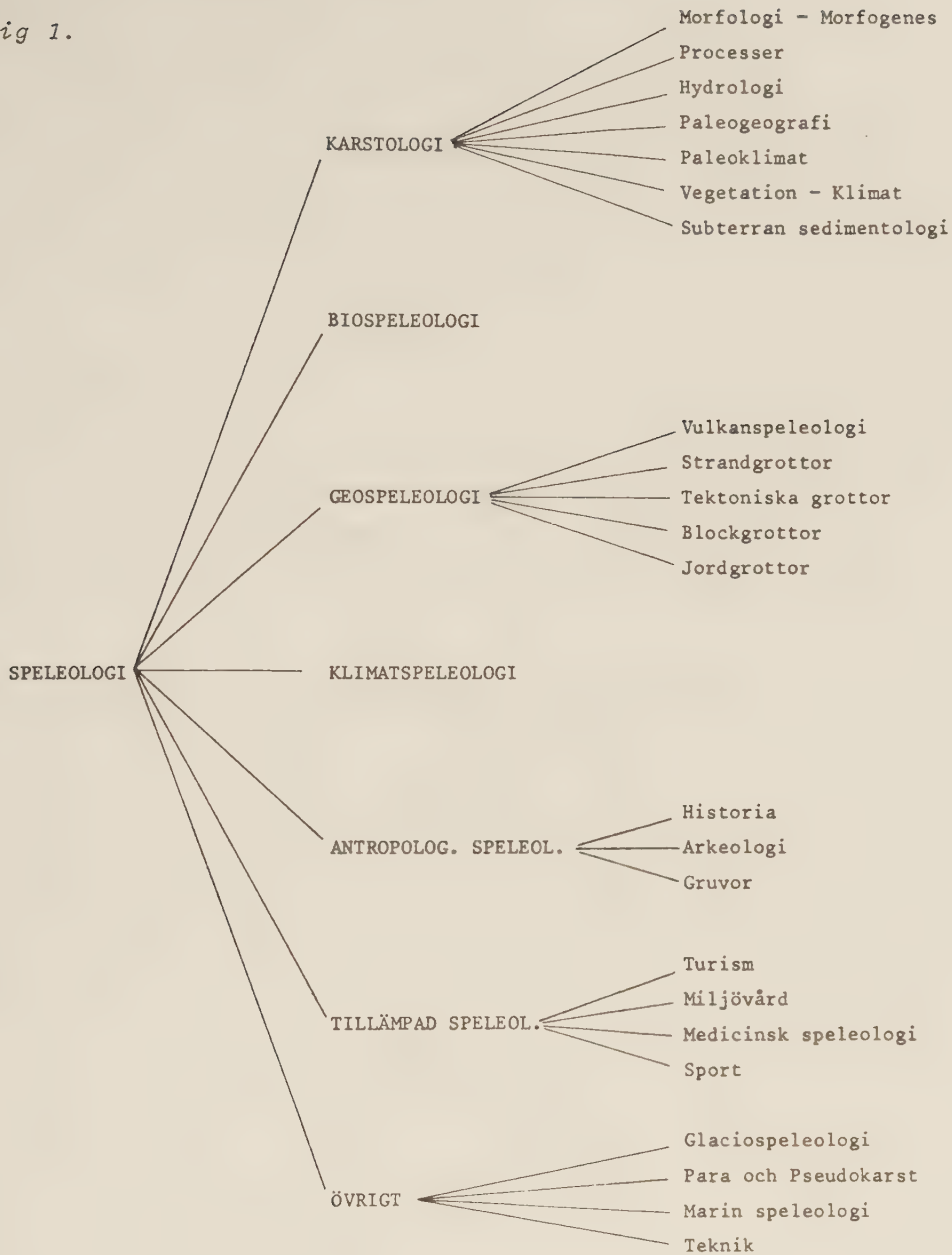
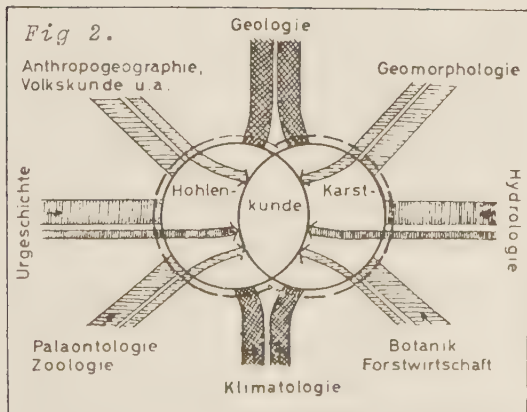


Fig 1. Författarens förslag på uppdelning av begreppet speleologi

Fig 2. Sambandet mellan karstologi och grottforskning, enligt Trimmel (1968). Den yttre streckade cirkellinjen avgränsar begreppet speleologi.



eologiska artiklar (Mansfield 1979) varav de flesta var författade av amatörer. Det finns ingen tillgänglig statistik på hur många som utövar speleosport i världen, men det verkar av publicerade artiklar att döma, som om det i de flesta länder i världen finns någon form av speleologisk organisation. Även om landet ifråga saknar karst kan det nämligen förekomma andra typer av grottor.

Grottturism, slutligen, är ekonomiskt sett en ganska betydande verksamhet. Med ledning av en publicerad lista över besöksfrekvensen i några av världens turistgrottor (Habe 1974) uppskattar jag det totala besökarantalet i världen till mellan 40 och 50 miljoner per år. Enbart i Öststaterna har man cirka 15 miljoner besökare årligen i grottor (Maximovich 1977).

KARSTFORSKNING OCH ÖVRIG SPELEOLOGISK VERKSAMHET I SVERIGE

Trots de ringa förekomsterna av karst i Sverige har många forskningsinsatser gjorts, främst då inom karstmorfologin. Jag vill hänvisa till en komplett förteckning över tidigare arbeten som finns i Helldén (1974). Detta verk är för övrigt en doktorsavhandling i ämnet och den hittills mest uttömmande beskrivningen av ett svenskt karstområde. Tidigare har två lic.avhandlingar presenterats i ämnet, Lars Nilsson (1968) om alvarkarsten på Öland och Gunnar Rasmusson (1957) om några karstgrottor vid Torne träsk. Utöver detta har ett flertal uppsatser publicerats ända sedan den första skrevs av Svenonius (1880). Karsten vid Lummelunds bruk på Gotland har tilldragit sig det största intresset om man ser till antalet publicerade artiklar. Dessa arbeten behandlas ingående i kapitel 3.

Utöver de karstinriktade arbetena har det publicerats en del om svenska grottor i andra bergarter än kalksten, främst då om grottor i urberg. Den första mera omfattande avhandlingen publicerades av Munthe (1920), "Strandgrottor och andra närstående fenomen". Av Tells många uppsatser om dessa fenomen kan bl a "Urbergsgrottor" (1969) nämnas. Helt nyliken har två seminarieuppsatser om urbergsgrottor, i Ångermanlands och Västerbottens kusttrakter, färdigställts av Rabbe Sjöberg

(1978 och 1979).

Den karstspeleologiska forskningen i landet har huvudsakligen bedrivits inom tre regioner, i fjällkedjan från norra Jämtland och norrut, på Öland och Gotland samt i nordöstra Skåne. De stora kalkområdena vid Siljan och Storsjön har hittills inte ägnats någon större uppmärksamhet varför det inte är känt i vilken grad dessa områden är karstifierade. Ett tiotal grottor är dock kända därifrån.

De mindre förekomsterna av urkalksten och kambrosilurisk kalksten i Mellansverige är också dåligt undersökta ur karstsynpunkt. Under slutet av 1970-talet har dock en hel del karstfenomen, inklusive grottor, upptäckts i regionen (Larsson & Åström 1979).

Det finns en svensk förening som sysslar med speleologi, Sveriges Speleolog-Förbund. Föreningen består till största delen av amatörer som i huvudsak upptäcker, utforskar och kartlägger grottbildningar. Flera av medlemmarna har emellertid via studier eller sitt yrke specialkunskaper som de utnyttjar till att bedriva detaljstudier inom speleologin. Förbundet ger sedan 1966 ut en kvartalstidskrift (Grottan) med artiklar och notiser av skiftande speleologiskt innehåll.

"Arkiv för svensk grottforskning" är en skriftserie som gavs ut av svensk grottforsknings nestor Leander Tell. Serien omfattar 14 publikationer. 1978 startade Sveriges Speleolog-Förbund en ny serie "Svenska grottor".

FÖRELIGGANDE UNDERSÖKNING

Det ursprungliga syftet med undersökningen var att göra en inventering åt Naturvårdsverket. Denna skulle tjäna som underlag till en planerad naturreservatsbildning i området. Under arbetets gång insåg jag emellertid att det i Lummelundagrottan och det tillhörande karstområdet fanns ett rikhaltigt och intressant material som borde undersökas utöver vad inventeringsarbetet omfattade och medgav. Visserligen hade flera tidigare arbeten utförts i området men varje undersökning behandlade bara en-

staka företeelser. Jag såg i Lummelundas karstområde en möjlighet att utföra en så fullständig speleologisk studie som möjligt. Denna typ av studier, där alla relevanta speleologiska aspekter behandlas, benämnes framledes för tvärspeleologiska. Av de över 5 000 speleologiska titlar som publicerades 1978 (Mansfield 1979) var det ingen som var rent tvärspeleologisk. 1975 presenterade Talbour ett av 1970-talets fåtaliga försök till en tvärspeleologisk studie. Denna avhandling vill på intet sätt göra anspråk på att vara en fulländad tvärspeleologisk studie. Jag instämmer istället helt med Eraso (1976) när han säger: "Den autentiska karstforskningen är inget enkelt problem då det finns ett flertal aktiva faktorer (geologiska, klimatologiska, fysisk-kemiska, biologiska, hydrauliska etc.) och du bör vara specialist i varje berört ämnesområde". Åtskilliga doktorsavhandlingar i speleologi har publicerats, men de är mestadels inriktade på en enda problemställning som t ex paleotemperaturstudier via radiometrisk datering av kalcitutfällningar i grottor (Harmon 1975) eller studier av sediment i grottor (Bull 1976).

Föreliggande arbete spänner alltså över ett flertal av karstspeleologins problemområden (se innehållsförteckningen). Detta har tyvärr medfört att vissa delundersökningar ej är helt uttömmande. Främst gäller detta för grottans klimat och de lösa avlagringarna i grottan.

Tonvikten i avhandlingen har lagts på själva Lummelundagrottan då den utgör en synnerligen intressant och komplex bildning. Jag vill redan nu särskilt påpeka att såväl grottan som tillhörande karstområde inte är typiska fenomen för Gotland utan snarare undantag.

Min målsättning med avhandlingen är:

- Att sammanställa alla väsentliga fakta i och om karstområdet vid Lummelunds bruk
- Att deskriptivt och analytiskt utreda områdets geomorfologi, hydrologi och utveckling samt Lummelundagrottans klimat, avlagringar och dess biologiska innehåll.

- Att medelst Lummelunds karstområde som fallstudie sammanställa de senaste rönen inom speleologins olika forskningsgrenar.

Fältarbetet påbörjades i maj 1977 och avslutades i juli 1980. Arbetet har av praktiska skäl enbart kunnat bedrivas i perioder om 4 - 14 dagar. Fältarbete utfördes 1977 under veckorna 18, 21, 22, 23, 24, 26, 39, 40, 43, 44, och 47. 1978 under veckorna 3, 4, 12, 15, 16, 22 och 36. 1979 under veckorna 20, 28 och 29. 1980 under veckorna 10, 21 och 26.

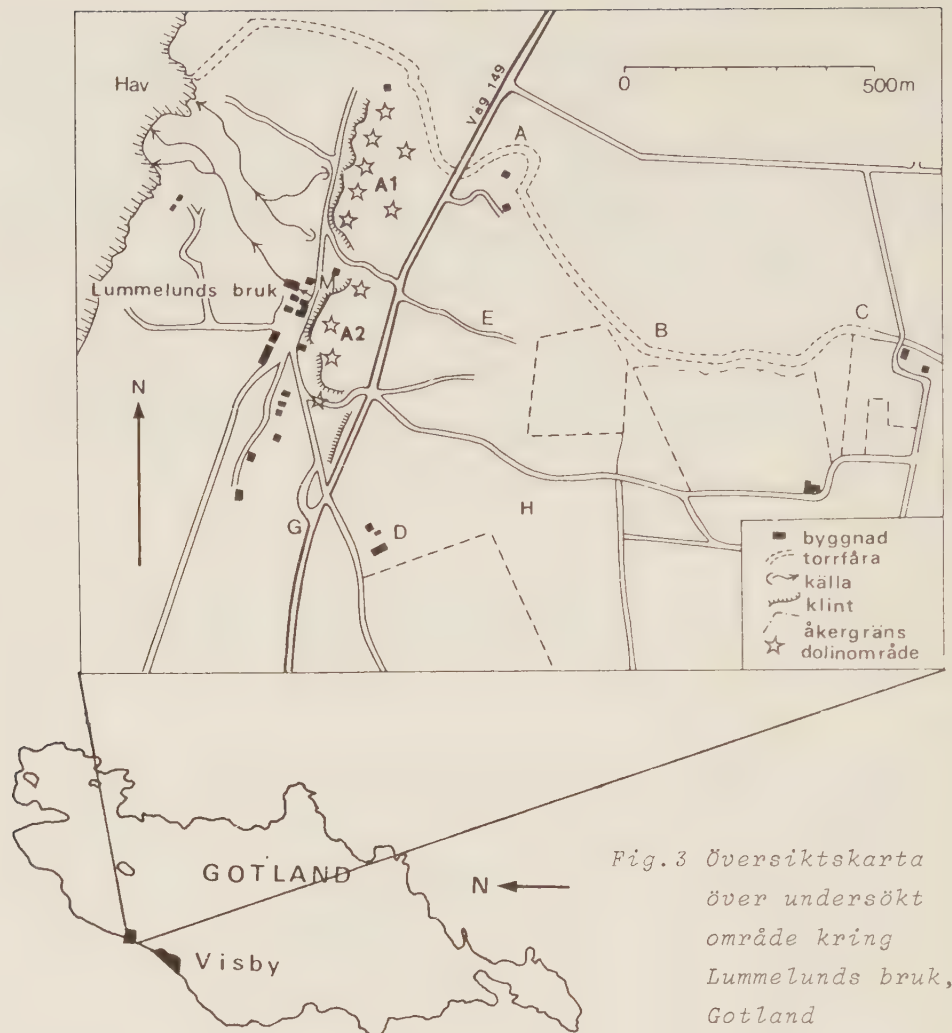
Därtill har jag 12 års erfarenhet av speleologisk verksamhet med bl a sammanlagt 8 månaders fältarbete i fjällen.

2. ÖVERSIKTLIG BESKRIVNING AV UNDERSÖKT OMRÅDE

Det undersökta området är beläget cirka 13 km norr om Visby vid Lummelunds bruk, även benämnt Överstekvarn. Kartan nedan, fig. 3, visar på hela det område, som berörts av undersökningen. Intensivundersökning har utförts i den västra delen av området, med avgränsning åt öster strax bortom punkterna A och D. En detaljerad karta med nivåkurvor har upprättats över denna karst-morfologiskt intressanta del (fig. 4). En detaljerad studie har också utförts av kanalen, d v s Lummelundaströmmens intermittenta fåra från Martebo myr ner till havet.

KLIMAT

Hela Gotland har ett fukttempererat (oceaniskt) klimat med varm sommar, typ Cfb enligt Köppens klimatklassificering (Köppen 1936). Klimatet vid Lummelunds bruk skiljer sig troligen föga från klimatet i Visby varför temperaturvärdena från Visby i tabell 1 kan antas gälla. Temperaturvärdena är hämtade från Ångström (1974) och de gäller för perioden 1931 - 1960. Nederbördsdata är hämtade från SMHI:s mätstation, 570 Lummelunda, som är belägen i dräneringsområdet. Observationsperioden sträcker sig mellan 1966 och 1975.



Tabell 1. Månadsmedeltemperatur och månadsnederbörd, Lummelunda

	jan	feb	mar	apr	maj	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec
$^{\circ}\text{C}$	-0,6	-1,4	0,0	4,3	9,0	13,9	17,1	16,6	12,9	8,3	4,1	1,8
mm	40	29	33	39	57	17	41	67	51	66	70	44

Årsmedeltemperaturen under perioden 1931-60 var $7,1^{\circ}\text{C}$ och årsnederbörden under 1966-75 var 554 mm. Nederbördsstationen är belägen 2 km innanför kusten och enligt ortsbefolkningen regnar det något mera i det kustnära området.

GEOLOGI

Öster om landsvägen är terrängen flack och sluttar svagt in mot Martebo myrs centrala delar. Berggrunden är här täckt av lösa avlagringar av ringa mäktighet. Enligt SGU:s karta Aa No 183 utgöres jordlagren av morän, isälvsavlagringar och svämgrus (från Baltiska issjön). I den numera utdikade Martebo myr utgöres jordtäcket av bleke överlagrad med kärrtorv. Omedelbart väster om landsvägen och längs denna finns en smal remsa av morän vars västliga gräns utgöres av en strandlinje (markerad på kartan fig. 4) med klappersten. Mellan punkterna C och F på samma karta avgränsas moränen av höjdkurvan 42 m. Där strandvallen och moränen upphör åt väster är berggrunden täckt av ett tunt lager vittringsjord fram till klinten. Omedelbart nedanför klinten finns rasackumulationer som synbarligen jämnats ut, förmodligen av vågpåverkan. Vid själva bruket saknas rasmassorna varför man kan förmoda att de använts till byggnadsändamål eller dylikt.

Mellan klinten och den nutida strandlinjen täcks berggrunden huvudsakligen av sandiga sediment från Litorinahavet.

Berggrunden på Gotland består av lagrade och olagrade kalk- och sandstenar från silurtiden. För cirka 400 miljoner år sedan sedimenterade lera, kalk och sand på botten av ett tropiskt hav, och idag återfinner vi dessa sedimentpackar, med en mäktighet av totalt 500 m (Munthe 1925), som bergarter på Gotland. I dessa lagerpackar kan man urskilja 13 olika tidsperioder (grupper) varav de fyra äldsta förekommer i det undersökta området.

Fig. 5 visar berggrunden från kusten och in mot Martebo myr. Längst ut vid kusten finns den äldsta lagerserien på Gotland, Undre Visby märgelsten. Mellan kusten och klinten förekommer Övre Visby märgel som överlagras av Högklintsgruppens kalkstenar vilka bildar själva klinten. Högklintsgruppen består av fyra underavdelningar (facies) varav tre stycken, Högklint A-C, finns representerade i området enligt Lindén & Odell (1978). Ungefär 1,3 km från kusten överlagras Högklintsgruppen av den hårdare Toftakalkstenen, som i Martebo myr i sin tur överlagras av den femte gruppen, Slitegruppen.

Fig. 5 visar ett vertikalsnitt av lagerserierna.



Fig. 4 Karta över detaljundersökt område. 2-Lummelundagrottans mynning.

Kartan upprättad i fält med måtbordstackymeter. Ekvidistansen

är 1 m

Kalkstenarna är mycket fossilrika och innehåller bl a koraller, krinoider (sjöliljor), snäckor och musslor. Fossilerna kan bäst studeras i klinten, i grottan och i den sprängda kanalen. Beskrivningar av fossillokaler har gjorts av Munthe et.al. (1925), Regnell & Hede (1960), Mantén (1971) och Laufeld (1974). Själva klinten i området består i huvudsak av revkalksten med vissa inlagringar av märellinser. På den renspolade ytan ovanför klinten har doliner utbildats i revkalken.

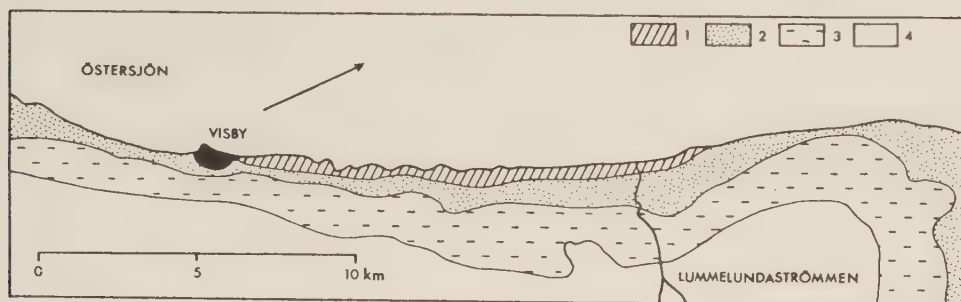


Fig. 5 Berggrundskarta över kuststräckan Visby-Lummelunda.

1 = Övre och Undre Visby märellsten

2 = Högklintseriens kalkstenar

3 = Tofta kalksten

4 = Slitegruppen

(detalj efter Lundqvist et.al. 1940)

VEGETATION

En vegetationskarta har upprättats (fig.6), samt en beskrivning till denna. I korthet kan sägas att området nedanför klinten i huvudsak består av ängsmark och askskog medan området ovanför klinten är beväxt med tallskog.

Fältskiktet i tallskogen består av olika gräs som kruståtel, älvväxing och hundväxing samt av lundstarr, blåsippor och orkidéer. I vissa delar av tallskogen finns täta snår av sly. De vanligaste slyväxterna är nypon, en, slån och ask. Fältskiktet nedanför klinten består av olika sorters ängsgräs och i askskogen nästan uteslutande av ramslök. Ramslöken är en utmärkt indikatorväxt på hög grundvattenyta då den kräver sipprande vatten i markytan.

Karteringen, som utförts med hjälp av Jan Jörgensson, är genom-

förd på våren då artrikedomen är som störst.

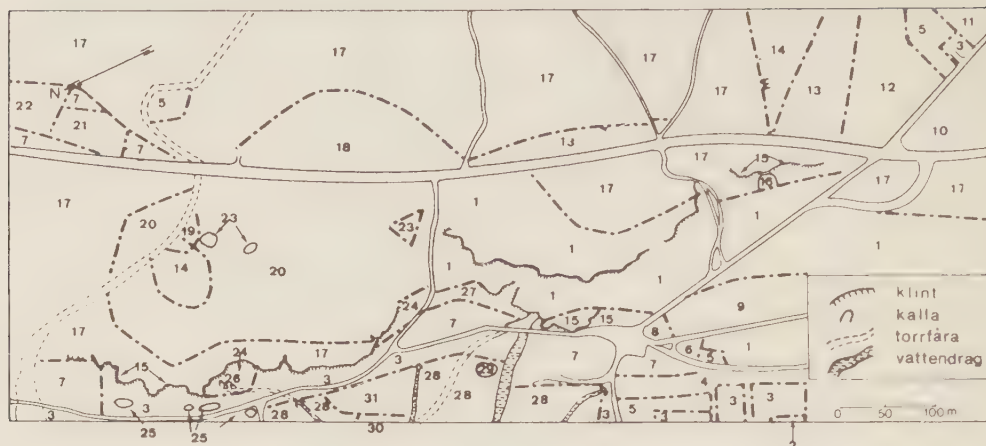


Fig.6 Vegetationskarta över området vid Lummelunda bruk

1. Relativt högvuxen tallskog med tät och riklig slyvegetation, som förutom de vanliga slyväxterna har rönn, hagtorn, lönn, sälk, gran och körsbär. Fältskiktet, som är heltäckande, består förutom av ovan nämnda arter också av vårfryle.
2. Dike fyllt av slån, nypon och enstaka askar.
3. Ängsmark där det utöver ängsgräsen finns rika förekomster av kirskaål, ogräsmaskros och smörblommor.
4. Väg- och ängskanter bevuxna med vildapel, rönn, ask, lönn, asp och rikligt med slån samt enstaka tallar och enar. Markskiktet består av gräs, gullviva, svalört, blåsippa, kirskaål och ramslök.
5. Trädgårdsmark.
6. Öppen gräsmark med enstaka dungar av hassel, lind och asp. Enstaka gullregn.
7. Gräsplan.
8. Gräsmark med enstaka aspar, askar och lönnar.
9. Tallskog med insprängda bostadshus och trädgårdar.
10. Storvuxet tätt tallbestånd med enstaka mindre bestånd av sly och idegran. I det fältskiktet ingår även vitsippa.
11. Hästhage med gräs.
12. Glest tallbestånd i hästhage med gles tornig slyvegetation.
13. Relativt lågt och tätt tallbestånd. Sly endast utefter vägen.
14. Kalhygge med enstaka aspar. Marktäcket domineras sommartid av Örnbräken.
15. Detta område utgöres i huvudsak av själva klinten där berggrunden ställvis ligger blottad. Förkrympta tallar, enar, slån, nypon, skogstry och skogsek växer spritt. Marken är delvis täckt av älväxing, nagelört, grusbräcka, stenkrassing,

gul och vit fetknopp, lundstarr, knölbräcka och i skrevorna svartbräken. Området sträcker sig längs hela den markerade klinten.

16. Rent lövskogsbestånd med ask, rönn och lönn.
17. Tallskog med ringa inslag av sly.
18. Öppen terräng med låga tallar och enstaka låga exemplar av rönn, ask, en och nypon.
19. Marken domineras sommartid av Örnbräken.
20. Mycket gles, hög tallskog med litet inslag av sly.
21. Bleke.
22. Mindre grustag.
23. Klapperstensfält.
24. Smal remsa nedanför klinten, främst talusmaterial. Övervägande lövskog med ask, lönn och slån med inslag av mindre enar.
25. Låga slånbestånd.
26. Ren askskog där markskiktet helt domineras av ramslök.
27. Lönn och ask.
28. Öppen askskog på fuktäng. Inslag av bok, idegran och lönn. Marktäcket domineras av ramslök men det förekommer inslag av svalört, kirskål, skelört och älgört. I de torrare partierna dominerar ängsgräsen.
29. Ett litet, rent kirskålsbestånd.
30. Ett rent älgörtsbestånd.
31. Ett planterat avenboksbestånd.

Förteckning över i det undersökta området påträffade arter.

Nomeklatur enligt Lid, 1974

Ask	<i>Fraxinus exelsior</i>
Asp	<i>Populus tremula</i>
Avenbok	<i>Carpinus betulus</i>
Blåsippa	<i>Anemone nobilis</i>
Bok	<i>Fagus sylvatica</i>
Skogsek	<i>Quercus robur</i>
En	<i>Juniperus communis</i>
Gran	<i>Picea abies</i>
Grusbräcka	<i>Saxifraga tridactylites</i>
Gul fetknopp	<i>Sedum acre</i>
Gullregn	<i>Laburnum anagyroides</i>
Gullviva	<i>Primula veris</i>
Hassel	<i>Corylus avellana</i>
Hagtorn	<i>Crataegus</i> sp.
Hundäxing	<i>Dactylis glomerata</i>
Idegran	<i>Taxus baccata</i>
Kirskål	<i>Aegopodium podagraria</i>
Knölbräcka	<i>Saxifraga granulata</i>
Kruståtel	<i>Deschampsia flexuosa</i>
Körsbär	<i>Prunus</i> sp.
Lundstarr	<i>Carex montana</i>
Lönn	<i>Acer Platanoides</i>
Ogräsmaskros	<i>Taraxacum cordatum</i>

Murgröna	<i>Hedera helix</i>
Nagelört	<i>Erophila verna</i>
Nypon	<i>Rosa sp.</i>
Orkidé	<i>Orchis sp.</i>
Ramslök	<i>Allium ursinum</i>
Rönn	<i>Sorbus aucuparia</i>
Skelört	<i>Chelidonium majus</i>
Skogstry	<i>Lonicera xylostium</i>
Slån	<i>Prunus spinosa</i>
Smörblomma	<i>Ranunculus sp.</i>
Stenkrassing	<i>Hornungia petraea</i>
Svalört	<i>Ranunculus ficaria</i>
Svartbräken	<i>Asplenium trichomanes</i>
Sälg	<i>Salix caprea</i>
Tall	<i>Pinus sylvestris</i>
Vildapel	<i>Malus sylvestris</i>
Vit fetknopp	<i>Sedum album</i>
Vitsippa	<i>Anemone nemorosa</i>
Vårfryle	<i>Luzula pilosa</i>
Älgört	<i>Filipendula ulmaria</i>
Älväxing	<i>Sesleria caerulea</i>
Örnbräken	<i>Pteridium aquilinum</i>

ALLMÄN MORFOLOGI

Områdets topografi framgår av fig.4 där höjdkurvor med en meters ekvidistans finns inlagda. På denna karta finns också de mera betydande morfologiska dragen som klintar och strandvallar markerade, liksom de formelement som kännetecknar ett karstområde d v s doliner, torrdalar och källor. Utöver dessa karstformer förekommer grottor, slukhål och subterrana vattendrag. De här uppräknade formelementen behandlas i kapitlen 4 och 5.

TIDIGARE ARBETEN I LUMMELUNDAS KARSTOMRÅDE

I detta avsnitt redogöres för undersökningar och publikationer av vetenskaplig natur. De undersökningar, som berör själva Lummelundagrottan, behandlas mera utförligt i kapitlet Forskningshistorik och turism.

"Subterrana vatten på Gotland med speciell hänsyn till Lummelundaströmmen" var titeln på den första vetenskapliga publikationen om Lummelundas karstområde. Den första delen utgavs 1948 och behandlade historik och morfologi, medan den andra delen, som utgavs 1950, hade undertiteln "Environmental conditions, plant and animal life, immigration problems". Författarna Torsten Gislén och Per Brinck genomförde sina undersökningar somrarna 1945-47. Deras arbete är av hög vetenskaplig kvalitet och utgör en värdefull dokumentation av flera företeelser. Speciellt värdefulla i detta sammanhang är deras studier av Lummelundaströmmen, redovisade i skriften från 1948, där de bl a detaljerat redogör för slukhål i kanalen. Undersökningarna i själva grottan berörde enbart partierna strax innanför mynningen, då man vid den tidpunkten inte funnit förbindelsen till de inre delarna.

1955 publicerade Leander Tell en populärvetenskaplig bok betitlad "Underjordens vackra värld". Sidorna 19-33 ägnas där åt Lummelundagrottan och för första gången redogöres för de då nyupptäckta delarna av grottan. Bl a presenteras en detaljerad karta över den yttre delen av grottan, samt en översiktlig skiss av det som idag utgör turistdelen av grottan. Sedan dess har Tell skrivit åtskilligt om Lummelundagrottan både i Sverige och utomlands; bland de större arbetena kan nämnas "Lummelundagrottorna" (1:a upplagan 1960) och "Erosionsförloppet med särskild hänsyn till Lummelundagrottorna (1961a).

1955 publicerade H. Hinricsson en smärre artikel om vattnets karaktär och bakteriehalt i grottan.

Sommaren 1962 genomförde Nils Andersson och Mats Gusting under handledning av Gert Knutsson ett examensarbete betitlat "Hydrogeologiska undersökningar av Lummelundaströmmen". Arbetet i detta sammanhang värdefullt främst p g a tabeller och diagram för vattenföring, vattenstånd och temperatur i luft och vatten i grottan. De redogör också för ett spårningsförsök med radioaktiva isotoper i Lummelundaströmmens underjordiska del. Detta försök, som senare kompletterades av ett liknande under vårflödet 1963, redovisas på ett mera överskådligt sätt av Knutsson 1971 och 1974.

1964 genomförde Carl Fredrik Lundevall ett examensarbete i området. Uppsatsen betitlad "Karstmorfologiska undersökningar i

Lummelundaområdet" behandlar området geomorfologi. Till uppsatsen hör en kartbilaga, som förvaras på Naturgeografiska Institutionen i Uppsala. På denna karta finns ett stort antal avvägningar noterade, som kan vara av betydelse för framtida jämförelser. Några av resultaten från undersökningen redovisas i Geografiska Annaler (Lundevall 1965).

1964 upptäcktes en passage till ytterligare inre delar av grottan. Dessa beskrevs av Olsson & Lundevall (1966). I artikeln presenterades för första gången en karta över hela det då kända systemet.

Under 1970-talet har ett flertal undersökningar genomförts eller påbörjats, men relativt lite av resultaten har ännu publicerats. Jonas Åkerman har utfört en långtidsundersökning av klimatet i grottan och Ulf Helldén har arbetat med den kemiska denudationen i karstområdet. Båda är forskare vid Naturgeografiska institutionen i Lund och har tidigare publicerat arbeten om liknande undersökningar. Anders H. Lindén, geolog vid SGU, har inlett en bergmekanisk undersökning i grottan och utfört en elektromagnetisk undersökning (slingram) på markytan, för att spåra de okända delarna av grottan. Resultaten från denna undersökning är publicerade 1975 i Sveriges Speleolog-Förbunds tidskrift Grottan. I samma nummer redogör också Lars-Erik Åström för hur en del av det okända grottsystemet kartlagts med hjälp av en TV-kamera, som sänkts ner i en borrhål brunn. I början av 1978 presenterade Harriett Jasinski en seminarieuppsats som bl a behandlar den kemiska denudationen i Lummelundas karstområde. Fältarbetet har utförts i samarbete med mig som ett led i föreliggande undersökning.

Samma år framlades ett arbete av Jonas Åkerman där han redogör för ett försök att medelst IR-kamera spåra grottöppningar och submarina källor vid Lummelunda (Åkerman 1978).

Karstområdet vid Lummelunda har även uppmärksamats av ett par utländska karstforskare. Den franske geologen Georges Chabot publicerade 1943 en uppsats, "Naissance d'un karst: l'île Gotland dans la mer Baltique", i Annales de Géographie. 1952 publicerade fransmannen Jean Corbel en mindre artikel i Geografiska Annaler, "Les phénomènes karstiques en Suède". 1957 presenterade han sin stora avhandling "Les karst de Nord-Ouest de l'Europe" där också karsten i Sverige behandlas. I samtliga tre publikationer berörs Lummelundakarsten helt flyktigt.

3. STRANDBILDNINGAR

I området från landsvägen och ner till kusten förekommer det rikligt med former, strandvallar, landklint och strandgrottor, som vittnar om olika stadier i Östersjöns utveckling.

KLINT

Genom den västra delen av det undersökta området sträcker sig en vackert utbildad klint, avbruten enbart på ett fåtal ställen. Klinten är markerad på detaljkartan och det högsta partiet ligger öster om källa 3. Högsta punkten ligger här 41 m ö h och den vertikala nivåskillnaden är 21 meter.

Klintens bas ligger (under rasmassorna som döljer den) på mellan 21 och 23 meters höjd över havet, en nivå som ligger något under det forna Litorinahavet (se fig.7). Det är dock osannolikt att klinten bildades under denna korta period, även om den säkert omformats en hel del av Litorinahavets vågor. Förmodligen står klintbildningens ursprung att söka betydligt längre tillbaka i tiden (jämför Rudberg 1967).

I en studie av Gotlands klintkust har Rudberg (1967) uppskattat klintens reträtthastighet till 0,4 - 0,6 cm/år. Siffrorna gäller för den aktiva kustklinten där vittring och sluttningsprocesser, enligt Rudberg, svarar för regressionen medan vågaktiviteten huvudsakligen svarar för borttransport av materialet. Om nu klintreträten huvudsakligen härrör från vittring och sluttningsprocesser så borde de klintar som nu befinner sig på land också vara utsatta för bakåtskridande erosion. Då det här inte finns någon vågaktivitet, som kan föra bort det nedrasade materialet, borde därvid en talusbrant utbildas nedanför klinten.

Nedanföör landklingen i Lummelunda förekommer en smärre ras-ackumulation. Sluttningsvinkeln på dessa rasmassor är oftast liten, $15 - 25^{\circ}$ och materialet är bearbetat av vågor. På några ställen längs klingen finns det strandgrottor som helt eller delvis har fyllts igen av vad som synes vara talusmaterial, men detta material bär också tydliga spår av svallning. Troligt är alltså att fyllnadsmaterialet har svallats in i grottorna av Litorinahavets vågor. Av ovanstående drar jag slutsatsen att relativt få vittringsrester under klingen vid Lummelunds bruk är yngre än Litorinatid. Detta betyder i sin tur att regressjonen för klingen inte kan vara lika snabb som för den kustkling Rudberg har undersökt.

STRANDVALLAR

Som tidigare nämnts ligger Litorinagränsen i området på cirka 25 m ö h. Sydöst om källa 3 längs höjdkurvan för 25 m, finns spår efter en strandvall som troligen härstammar från Litorinahavet. Mera påtagligt är att ett stort antal grottor och strandhak finns utbildade i klingen just vid denna nivå (se tabell 2). På kartan, fig.4, mellan punkterna B och C finns en tydlig strandvall markerad på cirka 40 m ö h. Lundevall hänför denna vall till Ancylussjöns högsta kustlinje vilket förefaller rimligt. Strandvallen avslutas i söder av ett klapperstensfält (markerat på kartan) i vilket vallar på tre olika nivåer kan iakttagas.

Fig.7 visar en strandlinjeprofil som sträcker sig från havet, över Lummelundagrottans mynning och fram till kanalen vid slukhålsområde A. Som jämförelse visas en profil från Lickershamn. Nedanföör klingen vid källa 4 finns ytterligare en strandvall markerad, dateringen av denna är dock osäker liksom för de vallar som påträffas längre ner mot den nuvarande strandkanten.

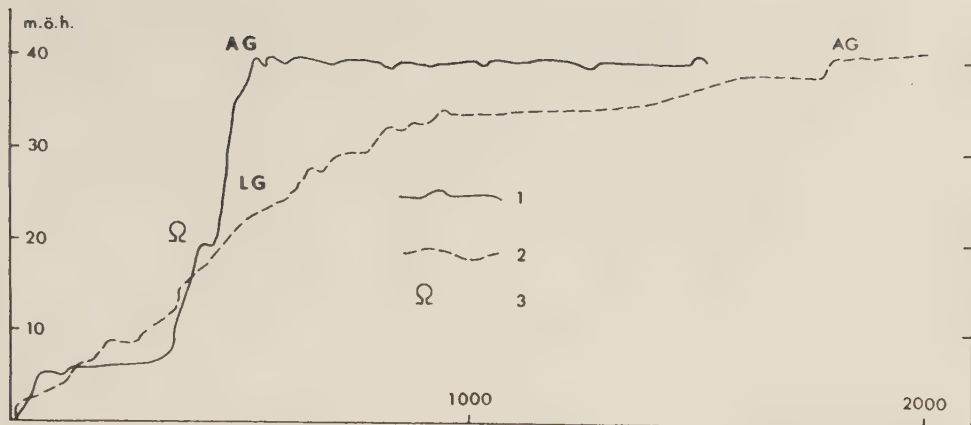


Fig. 7 Strandlinjeprofiler med litorina- (LG) och ancylus-gränsen (AG) markerade.

- 1 = profil från havet över Lummelundagrottan (3) till slukhålsområde C (efter Lundevall 1964 och Andersson & Gusting 1962)
- 2 = Jämförande profil från Lickershamn (efter Lundqvist et.al. 1940).

GROTTOR OCH STRANDHAK I KLINTEN

Lundevall (1964) har i sin uppsats noggrant redogjort för strandhak och grottor längs klinten. Han har noterat 30 objekt (markerade i fig.8), som han i beskrivningen delat upp i 41 enheter. Därav anges 29 st (27 st i Lundevall 1965) vara mer eller mindre bildade genom kemisk utlösning. Mina iakttagelser ger vid handen att korrosionen varit den dominerande processen vid bildandet av högst två av dessa grottor. Övriga grottor saknar såväl spår av korrosion som av för processen nödvändigt vatten. Då Lundevall dessutom vid upprättandet av sin beskrivning grundat sig på ett klassifikationssystem, som inte längre används inom speleologin har jag reviderat beskrivningen helt.

Då denna avhandling i första hand skall behandla karstfenomen får presentationen av övriga former bli summarisk. De enskilda objekten i klinten behandlas därför inte ingående utan presenteras i överskådlig tabellform, där genes, storlek och höjd anges. Numreringen hänvisar till objektets läge på detaljkartan figur 8.



Fig.8 Grottor och strandhak i klinten. Siffrorna hänvisar till tabell 1

Vid den genetiska klassifikationen används följande förkortningar:

SB = strandbildningar (litorala bildningar). Därmed avses former skapade genom abrasion (mekanisk nedbrytning genom vågverkan i strandzonen). Om bildningen uppfyller den nu alltmera vedertagna definitionen på grotta, "hålighet med tak, väggar och golv, där en vuxen person av normalstorlek rymmes", har den kallats för strandgrotta.

LV = landvittring, d v s supralitorala bildningar (ovanför strandzonen). Dessa håligheter har bildats genom samverkan mellan följande processer: frost-, sol- eller saltsprängning samt vegetationspåverkan (rotsprängning) och korrosion. Störst verkan har dessa processer haft (främst då frostvittringen) där vatten tränger fram ur klinten. Då

detta sker i svaghetszoner som sprickor, skiktfogar och porösare skikt, återfinner vi de supralitorala bildningarna (LV) och omformningarna just där. Vittringen pågår förvisso längs hela klinten, men den sker något snabbare i nämnda svaghetszoner varvid håligheter bildas.

Bild 1 är ett exempel på detta. Svaghetszonen utgöres här av ett märelskikt. Bilden visar hur en spade sticks in i den spricka som bildats när märgeln vittrat bort. Efterhand som det stödjande märelskiktet försvunnit har ovanliggande partier rasat, troligen främst genom inverkan av frost- och rotsprängning (observera busken som växer i nischen).

I flera av urholkningarna tränger det fram fukt ur den bakre väggen. Fenomenet syns bäst vintertid via de isbildningar som då växer fram. När det framsipprande vattnet fryser sker en viss frostsprängning som kan bidra till att fördjupa håligheten. Vittringsrester i och framför grottor och nischer tyder i vart fall på detta. Nu är det inte troligt att denna fördjupning är en kontinuerlig process, de maximala grottdjupen i området ligger mellan fyra och fem meter vilket kan vara ett optimalt djup för grottor bildade genom LV. Ju djupare en grotta är desto stabilare blir klimatet i densamma (se bl a Åkerman 1972) varvid tillväxten via sol- och frostsprängning minskar. Studier av strandgrottor på andra delar av Gotlands klintkust samt på Karlsöarna har visat att det sällan förekommer LV av nämnvärd betydelse i grottor med ett djup överstigande cirka fem meter (gäller enbart om grottorna har, i förhållande till djupet, trånga mynningar).

De flesta strandbildningarna i området är mer eller mindre påverkade av de supralitorala vittringsprocesserna. I de fall denna påverkan är markant har detta markerats i tabellen med SB - LV.

Under "arm" i tabell 2 står SG för strandgrotta (abrasionsgrotta) och G för grotta bildad genom övrig mekanisk vittring. Höjden över havet anger lägsta punkten i hålighetens mynning. Flera av bildningarna är helt eller delvis igenfyllda av grus och sten. När det gäller grottorna har detta särskilt noterats då det kan betyda att dessa grottor egentligen är större än vad uppmätningen anger. Grotta 9A är typexempel på en sådan grotta, som är så fylld att endast en springa i taket är öppen.



Bild 1. Spaden visar ett märelskiht i klinten. Vittringen har varit intensivare i detta skikt än runtom. Efterhand som märeln försvinner störtar ovanförliggande bergparti bort varvid en nisch bildas. Foto Mischa Gavrjusjov.



Bild 2. Ett typiskt karstområde för Gotland, s k pavement med sprickkarren. Från skjutbanan vid Lauks. Foto Leif Engh.

Tabell 2. Grottor och strandhak utbildade i klinten. Reviderad efter Lundevall 1964.

Nr	Genes	Bredd	Höjd	Längd	h ö h	anmärkning
1	LV	1,6	0,7	—	26,69	
2	SB-LV	4,2	1,2	2,2	26,77	ombyggd till jordkällare
3	SB	5,6	1,2	4,9	24,61	SG
4	SB	1,7	1,9	1,7	26,2	
5a	SB	6,6	—	1,6	24,9	
5b	SB	1,1	0,6	0,8	27,4	
6	SB	4,8	2,3	2,5	25,2	
7	SB-LV	4,2	0,7	0,9	27,6	
8a	SB	5,4	0,8	1,5	24,9	
8b	SB	1,1	0,6	0,8	25,6	
9a	SB	3,9	0,4	3,3	25,1	SG helt fylld
9b	SB-LV	7,3	2,2	2,7	25,4	
10a-b	SB	10,6	2,6	4,0	24,6	SG
11	SB-LV	6,9	2,5	4,9	27,9	SG delvis fylld
12	SB-LV	12,0	3,6	3,7	25,4	SG delvis fylld
13	SB-LV	7,2	3,0	3,5	26,1	SG delvis fylld
14a	SB	2,5	1,3	2,9	25,3	Ev. igenfylld SG
14b	SB	3,1	1,4	1,7	26,8	
14c	LV	2,1	1,4	1,2	26,1	
15a-c	SB-LV	19	4,3	2,5	25,4	Komplex av flera bildningar
16	SB-LV	6,1	2,8	2,3	24,6	Komplex av flera bildningar
17a	SB	2,1	1,5	1,1	26,7	
17b-g 5 st mindre bildningar 2 SB och 3 LV, Ej omnämnda av Lundevall. Ej uppmätta.						
18	SB	1,7	0,4	1,5	19,2	
19a	SB-LV	2,6	0,9	1,6	26,1	
19b	SB	4,0	0,9	2,3	28,4	
20	LV	3,7	1,2	1,1	31,6	
21	SB-LV	4,5	2,5	5,0	31,6	SG
22a	LV	1,5	0,2	1,5	36,6	
22b	LV	2,0	0,4	1,1	36,3	
23	LV	2,4	0,6	0,9	30,9	
24	SB-LV	4,4	2,2	5,4	31,3	G
25	LV	1,4	0,3	1,0	30,4	
26	LV	1,5	0,7	1,0	30,4	
27	LV	2,0	0,6	1,1	29,5	
28	SB-LV	7,0	2,5	2,4	28,9	SG
29	LV	2,2	0,2	—	28,7	

4. KARSTFORMER

Med karstformer avses här bildningar, som i huvudsak bildats genom vattnets kemiska utlösning av kalkberggrunden, sk korrosion. Denna process, som förenklat kan sammanfattas:



har studerats och beskrivits i detalj av flera karstforskare.

En lättillgänglig sammanfattning på svenska har gjorts av

Helldén (1974).

När det aggressiva vattnet angriper en kalkstensyta så sker korrosionen inte likformigt över hela ytan. Av olika anledningar koncentreras anfrätningen till vissa zoner i ytan vilket så småningom kan ge upphov till sk karstformer. Dessa former kan variera i storlek från några mm till flera km. Då Helldén i sin avhandling från 1974 beskriver och definierar förekommande karstformer nöjer jag mig här med en summarisk sammanställning.

Karren är samlingsnamnet för de minsta karstformerna. Dessa förekommer som gropar, fåror, sprickor, rännor mm och varierar i storlek från någon mm till några meter.

Doliner varierar i storlek från någon meter upp till flera hundra meter. De utgöres av depressioner med en sluten botten, är vanligtvis mer eller mindre cirkulära med en diameter som överstiger djupet vilket kan vara från någon dm till ett hundratal meter. Doliner kan bildas genom långsam utlösning av berggrunden i skålform (fig.10B), sk lösningdoliner. En sk kollapsdolin eller instörtningdolin uppstår då ett underliggande hålrum störtar in (fig.10A). Alluvialdoliner kallas de bildningar som uppstår då ovanförliggande sediment sjunker ner i underliggande berggrund efter hand som denna löses ut (fig.9C), eller då sedimenten spolats ner i underjordiska hålrum och en grop (dolin) uppstår i det lösa materialet. Sprickdoliner är en överförstorad karrenbildning med långsmal form och vertikala väggar.

Karstdalar. I ett karstlandskap kan dalgångarna vara av flera olika typer och skilja sig markant från den vanliga typen av dalgångar som är kontinuerliga med ett vattendrag i botten. Karstdalarna kan vara djupt nedskurna i kalken, sluta eller

börja tvärt, vara permanent eller tillfälligt torrlagda. I de två sistnämnda fallen kallas dalarna torrdalar vilket är den vanligaste typen av dalar i ett karstlandskap.

Polje är en mycket stor karstdepression, storleksordningen upp till 10-tals km i längd. De förekommer huvudsakligen i områden som ej berörts av de sista nedisningarna. Undantag finnes, så har jag t ex funnit en poljeliknande bildning på den nordöstra sluttningen av fjället Mieseken vid Överuman. Poljen har en flat sedimenttäckt botten som mestadels är odlingsbar.

Sluk och källor. Sluk eller slukhål kallas den punkt där ett ytvatten försvinner ner i underjorden. Källa betecknar det ställe där ett underjordiskt vatten tränger fram i markytan.

Karstgrottor betecknar de underjordiska hålrum som uppstår då det i berggrunden nedträngande vattnet löser ut kalken. Grottorna kan vara torra, vattenförande eller vattenfyllda. Hålrum som inte rymmer en vuxen människa bör inte kallas grotta. Avslutningsvis skall sägas att karstformer inte enbart utbildas i kalksten. Dolomit, salt och gips är andra bergarter som lätt karstifieras, t o m granit kan uppvisa karstliknande former (pseudokarst).

Genom fältstudier på Öland och Gotland har jag kunnat konstatera att karstformer i princip förekommer överallt där kalkberggrunden är blottad. Tidigare beskrivningar av Nilsson(1968) samt Sepp & Luther (1961) bestyrker detta. Den helt dominerande formen är sprickkarren (eng. grikes och ty. Kluftkarren) d v s sprickbildningar som vidgats genom korrosion. Ett flackt område med blottad berggrund och genomsatt med sprickkarren kallas för pavement, mera sällan användes det tyska ordet Karrenfeld. Ett för Gotland typiskt pavement finns avbildat i bild 2.

Karstområdet vid Lummelunds bruk skiljer sig från andra kända karstområden på Gotland då det här inte förekommer pavement med sprickkarren annat än i ringa omfattning. Karstlandskapet är istället uppbyggt av doliner, karstdalar, sluk, källor och det förekommer karstgrottor vilket annars är sällsynt både på Öland och Gotland.

Ingen annan plats på Gotland har en sådan rik variation på karstformer. Karstdalar uppträder på enstaka håll. Källor och sluk förekommer relativt frekvent medan doliner har konstater-

terats enbart på ett par platser. Lummelundas karstområde är alltså inte att anse som ett för Gotland typiskt karstområde, det utgör snarare ett undantag.

DOLINER

De karterade dolinerna vid Lummelunda uppgår till 53 st. Som fig.4 visar är de belägna i ett cirka 100 m brett stråk, längs klintkanten. Utanför det karterade området, SV om, förekommer ytterligare 5 doliner. 49 av dolinerna utgöres sannolikt av lösningsdolinerna medan 4 utgöres av alluvialdolinerna.

Lösningsdolinerna är utbildade i en från början renspolad kalkberggrund av revkalksten som hör till Högklintsgruppen. Alluvialdolinerna har bildats i den grova klappersten, som bygger upp den markerade strandvallen.

Flera av dolinerna är svåra att urskilja och avgränsa i terrängen då de är tämligen flacka och då markytan har en allmänt orolig topografi. Detta är kanske den främsta orsaken till de skillnader som finns mellan min kartering och den som genomfördes av Lundevall 1964.

Andersson & Gusting (1962) har noterat två dolinområden öster om landsvägen, varav det östligaste nu är täckt av schaktmassor från kanalarbetet under 60-talet. Det västligaste området skulle utgöras av två doliner i skiktad kalksten. Lundevall (1964) kunde ej återfinna dessa och jag har i det angivna området funnit flatbottnade sänkor, som dock troligen härrör från stenbrytning.

Dolinerna kan morfologiskt indelas i tre grupper, deras inbördes olika utseende framgår av fig.9. Typ A har den klassiska formen hos en lösningsdolin, den mjukt rundade skålformen. Bild 3 visar en sådan dolin. Merparten av dolinerna har detta utseende. Ett fåtal doliner har den form som fig.9B visar. De tvära kanterna tyder på att mindre sättningar har skett i dolinerna eller på att dessa har utbildats i en skarpt avgränsad sprickzon.

Alluvialdolinernas form och uppbyggnad framgår av fig.9C samt av bild 4. Att tre av alluvialdolinerna har denna uppbyggnad, d v s klapperstenen har sjunkit ner i en lösningsdolin som



Bild 3. Lösningdolin vid Lummelunds bruk. Foto Misch Gavrjusjov.



Bild 4. Alluvialdolin i klappersten vid Lummelunds bruk. Det färska brottet i torvjorden under spaden indikerar att en sättning nyligen skett i markytan. Foto Mischa Gavrjusjov.

bildats under strandvallen, har konstaterats genom sondering. Den fjärde dolinen (markerad med B i fig.4) kan däremot vara resultatet av att klapperstenen förts ner i ett underliggande grottsystem. Vid sondering kunde någon fast berggrund inte konstateras (av praktiska skäl gick det bara att sondera till 1,5 m djup) och under arbetets gång sjönk dolinens botten plötsligt 10 cm. Under spaden i bild 4 syns ett skarpt avbrott i jordtäcket, detta tyder på att en nylig subsidens har skett i dolinen. Dolinen ligger eventuellt ovanför den förmodade sträckningen av ett hittills okänt grottsystem.

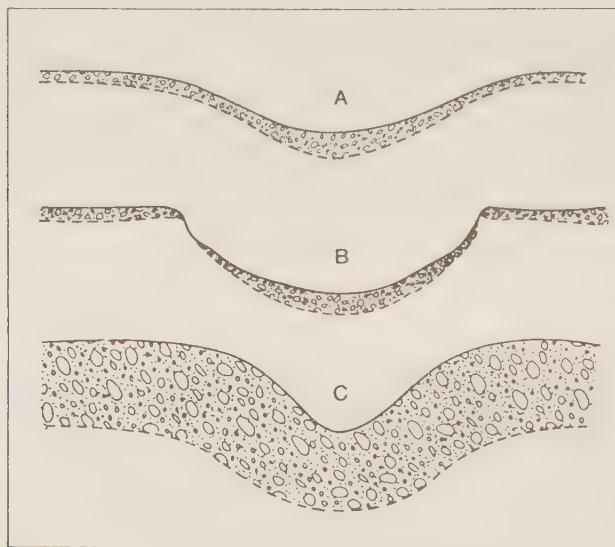


Fig. 9 Principskiss av olika dolintyper som förekommer i området. Streckad linje markerar berggrundsytan.

A = lösningsdolin täckt av tunt vittringslager.

B = som A men markerade kanter med blottad berggrund uppträder runt dolinkanten, troligen beroende på mindre sättningar i berggrunden.

C = alluvialdolin i klappersten. Stenarna sjunker ner i berggrunden efterhand som denna löses ut

Hur har då dolinerna uppkommit från början? Lundevall (1964) anser att dolinerna bildats genom instörtning av taket i underliggande grottsystem d v s att de skulle vara kollapsdolinerna. Grävning i 12 av dolinerna och sondering i övriga visar att så ej är fallet, merparten av dolinerna har istället bildats

genom en långsam utlösning av berggrunden. Fig.10 visar den principiella skillnaden mellan kollapsdoliner och lösningsdoliner. Dubbeldolinen vid L i fig.4 kan dock ha ett visst samband med en underliggande kollaps i Lummelundagrottan. Lunde-vall hävdar att så är fallet och framhåller som bevis en knyt-nävsstor sten av rapakivgranit som påträffats i grottan rakt under dolinen. Utbyggnaden av grottans visningsdel 1978-79, som skedde i just detta parti visade emellertid att raset i grottan var avgränsat uppåt. Detta är i och för sig ingen garanti för att ett samband inte kan råda. Bull (1977a) har påvisat ett samband mellan ras i grottor och ovanliggande doliner utan att mellanliggande berggrunden har kollapsat.

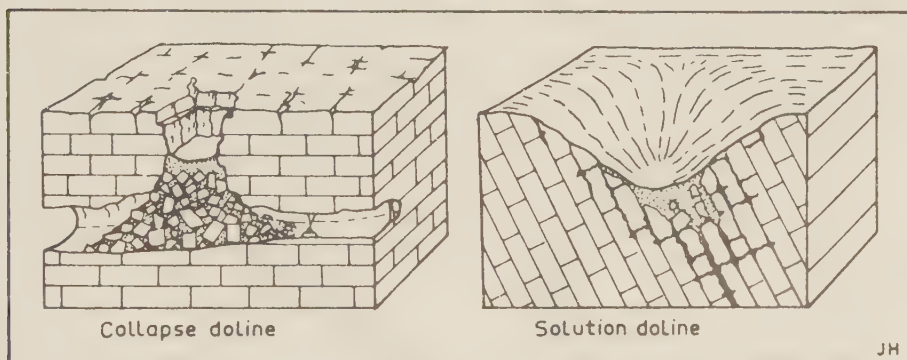


Fig.10 Principskiss av kollapsdolin och lösningsdolin (efter Jennings (1971))

Varför bildas det då lösningsdoliner överhuvudtaget, varför är den kemiska anfrätningen inte likformig över hela kalkytan? Denna fråga har främst behandlats av forskare i öststaterna. Jakucs (1977) sammanfattar dolinbildningen till att vara en samverkan mellan klimat, jordtäckte, vegetation, mikroorganismer och dränering. Han menar också att oregelbundenheter i dolinformen främst beror på mikroklimatet (solexponeringen) där olika markfuktighet, mikrobhalt och vegetation skulle ge upphov till ändrad markatmosfär vilket medför skillnader i pH och korrosionsintensitet. Att så är fallet bevisas av Barany & Mezosi (1977) i en artikel senare samma år.

I den västorienterade världen har själv dolinbildningen inte ägnats någon större uppmärksamhet men i litteraturen framgår det att man rent allmänt sammankopplar dolinbildningen med en

tät frekvens av sprickor i berggrunden (t ex Sweeting 1976). Till ovanstående teorier bör fogas det faktum att smältvatten från snö innehåller mer CO_2 än regnvatten vilket gör att snönederbörd är mera korroderande än regn (Williams 1949). Svackor och andra ställen där snö ackumuleras bör därför gynna bildningen av doliner på våra breddgrader.

Fig.11 visar ett rosdiagram över dolinernas orientering. De förefaller att vara orienterade i tre huvudriktningar. Detta kan hänga samman med sprickriktningar i berggrunden. Tyvärr går det ej att urskilja några sprickriktningar i den starkt uppluckrade berggrunden men en omfattande undersökning i Schweiz (Jamier & Mathey 1977) visar på ett samband mellan sprick- och dolinorientering. Helldén (1974) påvisade i Artfjällets karstområde ett starkt samband. Orienteringen på sprickorna, redovisade i fig.54-58, korrelerar inte med dolinernas längdriktning.

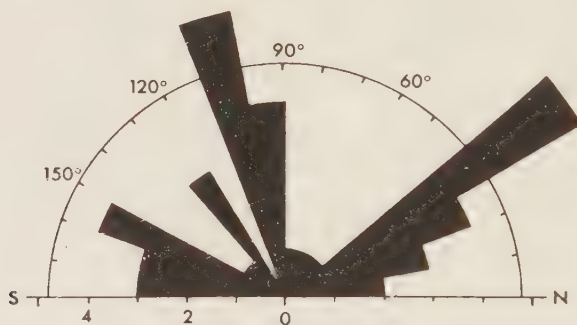


Fig.11 Rosdiagram utvisande riktningen på de 53 uppmätta dolinerna. Horisontella skalan visar antal, materialet uppdelat i 10° -klasser.

Botten i lösningsdolinerna består av ett tunt lager torv. Under detta finns en till synes uppkrossad berggrund där storleken på stenarna ökar med djupet. Fig.12 åskådliggör detta. Med ökat djup ökar också passformen mellan stenarna och till slut uppfattas de inte som enskilda stenar utan som en enhetlig berggrund genomsett med sprickor (fig.12 I). Denna sönderdelning av berggrunden påminner starkt om frostvittring, men huvudgenesen i det här fallet är förmodligen korrosionen. Teckningen visar att stenarna är avrundade, utom möjligtvis det översta lagret, vilket också framgår av bild

nr 5 som är tagen i horisont G på 23 cm djup. Mellanrummet mellan stenarna är utfyllt med torv och humus vilket skapar ett lågt pH med ökad kemisk utlösning av kalkstenen som följd. Jordens pH varierar mellan 4,5 och 5,5.

I fig.12 har också en skärning från en dolin på Västspetsbergen, vid Kongressvattnet, lagts in. Detta för att visa hur det ser ut när frostvittringen är den dominerande processen. Utrymmet mellan de skarphörnade stenarna innehåller här enbart luft.

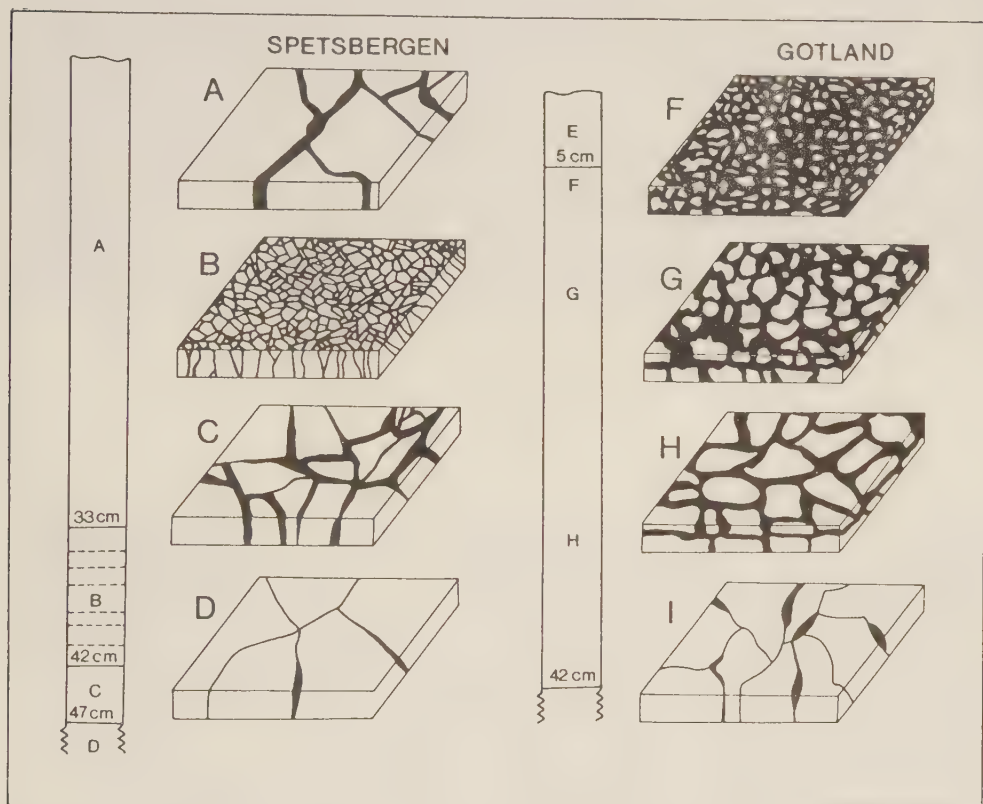


Fig.12 Skärning genom bottnen av två doliner. En typisk dolin från arktisk miljö, Spetsbergen, och en från Lummelunda. Svart markerar luftfyllt utrymme i dolinen från Spetsbergen och torv-vittringsjord i den andra.

Hur gamla är dolinerna i området?

Ser vi till dolinernas storlek så är de tämligen små vilket pekar på att de är unga bildningar. Flera av lösningsdolinerna utgör dock betydande sänkor i terrängen och borde därför innehålla strandmaterial om de existerade när Ancylussjön drog sig



Bild 5. Bottnen av lösningsdolin på 23 cm djup. Fotot illustrerar horisont G i fig.12. Foto Leif Engh.



Bild 6. Kanalen mellan slukhålsområde A och B. Lummelundaströmmens vatten försvinner här under jord via små dölda slukhål. Foto Mischa Gavrjusjov.

tillbaka. Alluvialdolinerna är definitivt yngre än ancylustid då de är utbildade i en strandvall från denna tidsperiod. Resultatet av beräkningar, som har utförts i kapitel 6, tyder på att dolinerna är postglaciala bildningar. Av ovanstående framgår att dolinerna sannolikt började bildas efter det att inlandsisen försvunnit d v s att de är högst cirka 12 000 år gamla.

SLUKHÅL

Som tidigare nämnts är slukhål beteckningen på det ställe i markytan där vattendrag försvinner ner till ett underjordiskt dräneringssystem.

De kända slukhålerna i området är samtliga belägna i Lummelundaströmmens artificiellt fördjupade strömfåra, den sk Kanalen. Endast ett fåtal av sluken har en öppning som överstiger $0,1 \text{ m}^2$.

Sweeting (1972) skiljer mellan två huvudtyper av slukhål:

1. Sluk med liten eller ingen relief (slutna sluk f.f.anm.), d v s sluken är så små att de ej framträder tydligt eller är dolda under avlagringar eller vatten. Ett vattendrag som avvattnas av sådana sluk förlorar successivt sitt vatten till det underjordiska dräneringssystemet. Detta skeende framgår av bild 6 där Lummelundaströmmen sinar utan att något sluk syns (fotot taget mot öster i snittet e-e, fig.13).
2. Slukhål med tydlig relief (öppna sluk f.f.anm.), d v s sluken kan urskiljas som hål i markytan där vattnet strömmar ner. Bild 12 visar ett sådant slukhål, om än ett litet, där resterna av Lummelundströmmen vid viss vattenföring slukas helt (fotot taget vid västra sluket i punkt 5, fig. 13).

Antalet synliga sluk i Lummelundströmmens fåra är således beroende av vattenföringen. Vid högvatten syns inget av sluken utom möjligen som en virvel i vattenytan. Sommartid försvinner vattnet mestadels ner i slukhål 3, fig.13, varvid övriga sluk nedströms är blottlagda.

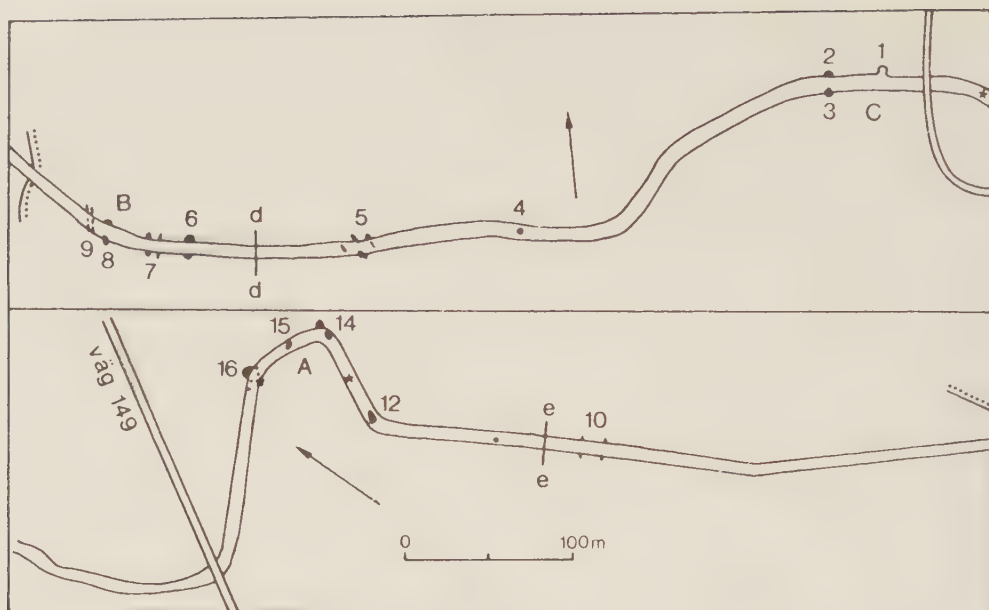


Fig.13 Lummelundaströmmens uppsprängda fåra = Kanalen. Från bron vid Kambs i öster till bron över väg 149. Läge och form på slukhålén markerade med överdriven storlek. A, B och C visar det tre slukhålsområden som omnämnes i texten.

Av ovanstående framgår att Sweetings indelning inte är helt tillämplig på alla sluk i Lummelunda, då flera av de öppna sluken inte syns vid högvatten. Framledes använder jag mig därför av föreslagna beteckningar "öppna" respektive "slutna" slukhål där de öppna sluken utgöres av tydliga hål men som kan vara dolda under vatten.

Helldén (1974) införde ett eget klassificeringssystem där han bl a talar om spricksluk vilket är en utmärkt beteckning på de 33 inkarterade sluken. Samtliga har nämligen utbildats i sprickor som succesivt utvidgas av det nedströmmande vattnet. Slukens lägen och former framgår av fig.13 liksom den inbördes storleken, sluken är dock återgivna i större skala än kanalen. Slukens kapacitet har visat sig ej stå i förhållande till slukens yta, storleken är således inget mått på kapaciteten. De flesta sluken har ungefär samma form som sluket i bild 12, långsmala med relativt skarpa kanter. Detta är dock inte den naturliga mynningsformen, när kanalen fördjupades sprängdes nämligen slukhålens övre del bort. Några av sluken vid område

B och C (fig.13) har dessutom fördjupats och vidgats genom sprängning i avsikt att öka dräneringskapaciteten (Gislén & Brinck 1948, Tell 1961a). Denna typ av slukhål, små spricksluk, är enligt Ford (1971) en vanlig företeelse i samband med grottor utbildade i horisontellt lagrad berggrund, så som Lummelundagrottan huvudsakligen är. Övriga större grottor i Sverige har bildats i veckad kalk och sluken som förekommer i samband med dessa är mestadels få och stora.

I kapitlet Hydrologi diskuteras slukhålens kapacitet.

KÄLLOR

Källa är en beteckning för det ställe i markytan där ett underjordiskt vatten tränger fram. Som en följd av den subterrana dräneringen är källor vanliga företeelser i karstlandskap. Karstkällor kan ha mycket stor kapacitet, i äldre välutvecklade karstområden kan hela floder springa fram ur berggrunden. I Sverige är de flesta karstkällorna sedda ur internationell synvinkel relativt små. Endast fyra källor har en vattenföring som överstiger $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Den största vattenföringen, $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$ har uppmätts i Lummelundagrottans mynning.

Ur hydrologisk synvinkel kan man indela källor i två olika huvudtyper:

1. Artesiska eller freatiska källor där vattnet står under hydrostatiskt tryck.
2. Vadösa källor med fritt flöde där det ofta finns ett luft-
rum mellan vattenytan och taket. En sådan källa kan ibland bjuda en framkomlig väg in till ett grottsystem, så är fallet i Lummelundagrottan. Detta är dock inte typiskt för svenska karstgrottor där källorna vanligtvis är små och har trånga öppningar. Sluken däremot kan vara rymliga och ge tillträde till grottan.

Ur morfologisk synvinkel kan två typer av källor särskiljas:

1. Öppna källor där vattnet strömmar ut genom ett tydligt hål.
2. Slutna källor där vattnet rinner fram ur lösa avlagringar eller via smala sprickor, d v s någon öppning kan ej påvisas.

Ur genetisk synvinkel skiljer man på två typer av källor:

1. "Resurgence", källor där det utströmmande vattnet huvudsakligen härrör från ett vattendrag, som avlänkats ner i underjorden via slukhål.
2. "Exsurgence", källor där vattnet huvudsakligen härrör från nederbörd som infiltrerats genom berggrunden.

Då en del källor inte är kontinuerligt vattenförande särskiljer man:

1. Permanent källor som alltid för vatten.
2. Intermittenta källor som ömsom är vattenförande och ömsom torra.
3. Fossila källor som inte längre släpper ut något vatten.

I det undersökta området har sex källor påträffats. Samtliga är belägna strax nedanför klinten och finns markerade i fig.4 med siffrorna 1 - 6.

Källorna 1, 3, 4, 5 och 6 är av artesisk typ, även om det hydrostatiska trycket i källorna 1 och 6 är ytterst lågt. Källa 2, Lummelundagrottans mynning (se bild 8), är till skillnad från övriga öppen och har fritt rinnande vatten. Det är den ojäm-förlligt största av källorna.

Källorna 1, 2, 3 och 4 hänföres till gruppen permanenta källor då ingen av dem har varit uttorkad under fältarbetsperioden. Källorna 2 och 4 har emellertid under sommartorkan en starkt minskad vattenföring varför dessa under extrema torrperioder eventuellt kan upphöra att vara vattenförande. Vilken grupp källa 6 skall hänföras till är svårt att avgöra då denna källa sprang fram ur marken under våren 1979. Persson (1960) beskriver en liknande händelse på Ivön i Skåne, där ett källsprång plötsligt dök fram ur marken. Den källan var betydligt mäktigare än källa 6, vilken som mest haft ett flöde på 2 l/s. Men källa 6 förefaller inte att vara helt nybildad. På en karta från 1696 finns det nämligen en källa utritad på ungefär samma ställe (se fig.16). Det verkar alltså som om källan varit tilltätpt en längre tid (tämligen länge då inga spår av en torr-fåra fanns kvar) tills den öppnades igen 1979.

Källorna 2 och 5 har påvisats tillhöra gruppen resurgence, där källa 2 får sitt vatten från slukhålsområdet B och C (fig.3) och källa 5 sitt från sluken vid A.

Källorna 1, 3 och 4 är förmodligen av typen exsurgence utom vid de tillfällena då Lummelundaströmmen når fram till slukhålsområde A. Vid dessa tillfällen ökas nämligen vattenföringen i källorna 3 och 4 markant vilket skulle tyda på att de då står i direkt förbindelse med sluken vid A. Spårningsförsök med färgämne har visat att källa 4 står i förbindelse med sluken. En anmärkning värd att notera i detta sammanhang är att de flesta karstkällor jag besökt på Öland och Gotland är av typen exsurgence medan merparten av de källor jag funnit i fjällvärlden är av resurgencetyp. Nämnas bör att ett resurgencevatten i befolkade områden är sämre ur nyttjandesynpunkt än ett exsurgence, då vattnet i källan kan innehålla föroreningar från dräneringsområdet.

Lundevall (1964) nämner ytterligare källor i området. I Lummelundaströmmens nordliga huvudfåra, mellan klinten och havet skulle således finnas fyra mycket små källor på 3.12, 5.50, 5.92 respektive 6.54 meters höjd över havet. Ingen av dessa källor har dock återfunnits.

Lundevall nämner också att det enligt muntlig uppgift från markägaren, Rolf Ödin, finns en intermittent källa under herrgårdsbyggnaden, källan är markerad på kartan från 1696 (fig. 16).

Åkerman (1978) har med hjälp av värmekamera påvisat en submarin källa strax utanför Lummelundaströmmens nordliga torr-fåra.

I nästa kapitel, Hydrologi, redogöres mera detaljerat för källornas kapacitet och inbördes förhållanden.

GROTTOR

Då kapitlet behandlar karstformer avses här grottor, som i huvudsak bildats genom korrosion. Det finns i området bara en känd grotta med denna genes, Lummelundagrottan, men vissa indicier pekar på att ytterligare ett grottsystem kan finnas. I klinten finns ett stort antal mindre grottor och grottanlag



Bild 7. Igenfylld grottmynning (objekt 12 i fig.8). Bakom den av vågor bearbetade rynningen finns ev. ett fortsättande grottsystem upp till slukhålsområde A i kanalen. Foto Leif Engh.



Bild 8. Lummelundagrottans naturliga mynning. Foto Mischa Garvjusjov.

bildade huvudsakligen genom mekanisk vittring. Dessa grottor behandlades i det föregående kapitlet Strandbildningar.

Lummelundagrottan är en av landets största grottor. Den karterade sammanlagda längden 2 430 m gör den för närvarande till Sveriges längsta kända grotta. Av fig.48 framgår att den utforskade och karterade delen bara utgör en del av det underjordiska systemet. Den kända delen av grottan når från utloppet räknat knappt halvvägs fram till de slukhål där grottan troligen har sin början.

Lummelundagrottan är en karstgrotta bildad genom att vatten sökt sig ner i kalkberggrunden och korrosivt urholkat sprickor och svaghetszoner. Under normalvattenföring dräneras hela ån via sluk ner i underjorden och rinner fram genom grottssystemet till grottans mynning (bild 8).

Undersökningar har visat att det troligen också existerar ett grottssystem mellan slukhålen vid A och källa 5 på detaljkartan, fig.4. Det underjordiska loppet är 310 m fågelvägen och nivåskillnaden är 18 m. Strax ovanför källan ligger en av rasmaterial delvis igenfylld grottmynning (objekt 12 i fig.8). Själva mynningen (bild 7) har bearbetats av vågor och har en strandgrottas form, men detta har även Lummelundagrottans mynning. När slukhålen vid område A är aktiva, strömmar det ut mer än 300 l vatten per sekund ur sluttningen framför grottan, vilket visar att en större underjordisk dräneringskanal existerar.

ÖVRIGA KARSTFORMER

Detaljkartan avgränsas i norr av en torrdal, vilken är Lummelundaströmmens nedre naturliga del (bild 9). Enligt Gislén & Brinck (1948) samt Andersson & Gusting (1962) var denna torrfåra sällan vattenförande, så sällan att de använder "manna-minne" som tidsmått. Under höst, vinter och vår 1977, -78 och -79 rann emellertid vattnet ofta fram i fåran trots en relativt ringa vattenföring. Orsaken är förmodligen den igensättning av slukhål som beskrives i hydrologikapitlet. Från källa 5 utgår två flacka torrdalar varav den ena blev upp-

grävd till en kanal (bild 14) sommaren 1977. Samma öde rönt en torrfåra vid källa 3, som efter utgrävningen nu är permanent vattenförande.

Efter utflödet ur grottan delar sig Lummelundaåns strömfåra i två grenar. Den nordligaste av dem är en torrfåra som är vattenförande endast vid extremt högvatten och inte ens då om de där befintliga regleringsluckorna är stängda.

I tidigare arbeten har ett antal "fönster" beskrivits och markerats på kartor. Termen fönster användes redan av L. Fegraeus i slutet av 1800-talet för att på en karta markera ett mindre hål i markytan vid Överstekvarn (Fegraeus 1888). Termen har sedan utnyttjats av andra författare för att i Lummelundaområdet beskriva håligheter i markytan, som förmodats stå i förbindelse med ett underliggande grottsystem. I den moderna engelska karstterminologin finns motsvarande uttryck, karst window.

Karstfönstret vid F på kartan har ej någon öppning då det ligger i en stentäckt sänka, men vid kall väderlek märks en uppåtgående luftström av varm grottluft. Denna utströmning av varm luft vintertid gör att fönstren lättast upptäcks när marken är snötäckt, runt öppningen har då snön smält undan.

Strax intill ligger håligheterna I och J som av Andersson & Gusting samt av Lundevall (1964 och -65) beskrivits som fönster. Någon uppåtgående varm luft har ej kunnat konstateras i någon av dem varför det är tveksamt om de verkligen är karstfönster, i så fall är de tilltäppta.

Fönstret vid F, benämnt Klafvers spricka, är troligen samma öppning som på tidigare kartor markerats cirka 100 m längre åt norr. Vid finkamning av terrängen i mars 1978 under en snö-situation med kall väderlek påträffades inga andra fönster än E och F.

Klafvers spricka (bild 10) visade sig vid denna undersökning bestå av en, från det kända fönstret åt norr fortsättande spricka med ytterligare tre luftutsläpp med ett par meters mellanrum. Denna spricka med fyra fönster ligger 53 meter från närmsta kända parti i grottan, men det råder ingen tvekan om att den står i förbindelse med grottan.



Bild 9. Lummelundaströmmens naturliga strömfåra omedelbart väster om bron över väg 149. Foto Mischa Garvjusjov.



Bild 10. Karstfönstret "Klafvers spricka" (E i fig.3 och 4). Hålet har förbindelse med underliggande grottssystem. Foto Rolf Engh.

Den minsta typen av karstformer, karren, förekommer sparsamt och dåligt utbildade vid H i fig.3. Troligen förekommer karrenformer i viss utsträckning även under jordtäcket där detta är tunt eller har låg karbonathalt. Klafvers spricka förefaller att vara sprickkarren, som brutit genom taket till grottan, men möjligheten att det är ett fossilt slukhål kan inte uteslutas.

5. HYDROLOGI

METODIK

Vattenföringen i Kanalen, vid slukhålen och i källorna, har mätts medelst två olika metoder. Vid vattenföring över cirka 20 l/s användes flygelmätning och beräkningarna utfördes enligt hastighet - ytametoden. Vid mindre vattenföring samlades vattnet upp i hink eller plastsäck under tidtagning. Denna senare metod är att föredra då den ger mera korrekta värden.

Mätningarna har utförts med oregelbundna intervall från maj 1977 till juni 1980. I bilaga 2 redovisas vattenföringen vid olika årstider.

Spårförsöken har utförts med färgämnen Rhodamin B och kaliumpermanganat. För uppsamling av Rhodamin B har aktivt kol (2 - 3 mm) i nylonnät använts. Kolen har hängt i 2 - 3 dygn i det strömmande vattnet. Kolkornen lades sedan på en vit tallrik i en lösning av 5% kaliumhydroxid i metanol. Vid hög koncentration kan rödfärgning iakttas för blotta ögat. När ingen färg syntes testades lösningen i en spektrofotometer (Beckman B). Metoden beskrivs utförligt av Drew (1968).

Vattnets totalhårdhet, d v s halten av kalcium- och magnesiumkarbonat, har bestämts genom en komplexometrisk titrering med Titriplexlösning A (EDTA) mot prov med Indikator-Pufferttabletter (Eriochromsvart), båda av märket Merck, artiklar 9894

respektive 8430. Helldén (1974) har beräknat metodens noggrannhet till 0,05 m.ekv./l.

pH mättes med en portabel pH-meter av märket Metrohm E 488. Den praktiska mätnoggrannheten ligger på 0,1 pH.

Temperaturen mättes med precisionstermometer, noggrannhet 0,1°C.

Järnhalten i vattnet bestämdes med snabbtitreringssats, Merck artikel 8013. Noggrannhet 0,2 ppm.

Nitrithalten bestämdes med dito Merck artikel 8036. Noggrannhet 0,05 ppm.

Fosfathalten bestämdes med dito Merck artikel 8046. Noggrannhet 0,5 ppm.

Nitrathalten med snabbtitreringssats med märket Tetra. Noggrannhet 20 ppm.

Mängden suspenderat material mättes genom indunstning av vatten och vägning av resten. Från den totala vikten subtraherades den mängd karbonat som bestämts i prov från samma tillfälle.

Färg och grumlighet kontrollerades visuellt i klara glasflaskor mot blindprov med dest.vatten.

LUMMELUNDASTRÖMMEN

Lummelundaströmmen kan delas upp i tre olika avsnitt. Den övre delen, från Martebo myr och ner till landsvägen vid A i fig.3 har fördjupats och breddats till en sprängd kanal (se bild 6), som längst upp förgrenar sig i mindre dräneringsdiken. Huvudkanalen har av lokalbefolkningen fått namnet Kanalen. Nedströms passagen under landsvägsbron, väg 149, finns den ursprungliga strömfåran bevarad. Större delen av året når emellertid inte vattnet fram till denna fåra, utan det söker sig ner i slukhål och rinner underjordiskt ända fram till Lummelundagrottans mynning. Här samlas vattnet i en mindre kvarndamm varefter det bildar ett vattenfall, som tillsammans med ytterligare forsar nedanför har en total fallhöjd på 13 m. Vattendragets sträckning härifrån och ut i havet kallas av befolkningen för Lummelundaån.

Ytan av Lummelundastömmens nuvarande dräneringsområde anges av VIAK (1969) till 68 km². Därav utgjordes före utdikningen av Martebo myr 38,5 km² av våtmarker där 11,9 km² var öppet

vatten (Sernander 1941). Före 1848 var Lummelundaån ett naturligt vattendrag som avvattnade det mycket stora våtmarksområdet mellan Tingstäde och havet. Fig.14 är ett avsnitt av en karta kring år 1700 och utvisar omfattningen av detta sammanhängande myr-träskområde. Lummelunds träsk, som numera är helt torrlagt, var på den tiden Gotlands största sjö. Enligt en skrivelse av Stephens 1819, hade våtmarkerna då en yta på $38,5 \text{ km}^2$ mot knappt 4 km^2 idag (beräknat efter topografiska kartan). Enligt Wahlin (1942) utgjordes för övrigt år 1870 cirka 10% av Gotlands yta av våtmarksområde = cirka 300 km^2 . 1940 hade denna siffra reducerats till cirka 20 km^2 .

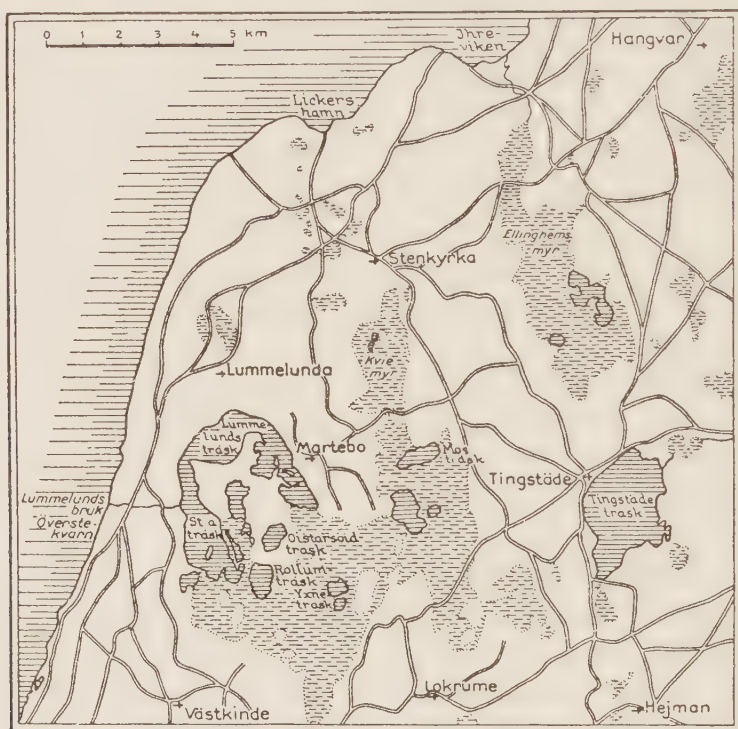


Fig.14 Martebo myr före utdikningen (detalj efter Moberg, hämtad från Gislén & Brinck 1948).

1847-50 utfördes den första utdikningen av Martebo myr med påföljd att myren till vissa delar var uttorkad 1855. Som en följd av tvistigheter mellan olika intressenter fullföljdes dock inte dikningsarbetet i tillräcklig mån varför myren, p g a marksjunkning och igensättning av kanalerna, åter började för-

sumpas. Det framgår inte av befintliga handlingar hur stor del av myren som odlades upp under 1800-talet. 1892 konstaterar Sylvan att det årets sänkningar endast möjliggjorde uppodling av cirka 3 km². Det framgår dock vid jämförelse mellan den äldsta kartan (fig.14) och Fegraeus karta från 1888 att större arealer än så var uppodlade. Sylvan noterade också att sjöytornas areal 1892 var ungefär oförändrade sedan före utdikningen. 1888 beslöts att omfattande utdikningsarbeten skulle igångsättas och vara klara till 1895. Kanalerna breddades och fördjupades. Slukhålrenas renades upp och vid de tre största (sluken vid B och C samt det nu icke återfunna "första sluket") sprängdes uppsamlingsbrunnar med flera meters bredd och djup. Gislén och Brinck (1948) beskriver detta i detalj och nämner också att slukhålren därefter tycks ha rensats vart eller vartannat år. Detta var en helt naturlig åtgärd då dräneringen byggde på slukhålrens kapacitet. Huvudavloppskanalen följer i stora drag den ursprungliga strömfåran troligen just för att kunna utnyttja slukhålren. Av denna anledning byggdes kanalen i de första omgångarna bara ut till strax nedströms slukhålsområdet vid C.

Då sluken hade en begränsad kapacitet var översvämningar av markerna i västra delen av dräneringsområdet ingen ovanlighet, speciellt vid vårfloden. År 1928 färdigställdes emellertid en ny kanal, Getsikskanalen, med utlopp vid Ireån i Ireviken. Denna kanal minskade väsentligt Lummelundaåns dräneringsområde och därmed även dess vattenföring. Gislén & Brinck (1948) anger efter intervjuer med ortsbefolkningen att högsta vattenståndslinjen i Kanalen sjönk markant.

Marksjunkningen i det forna myrområdet gjorde att man tvingades bredda och fördjupa kanalerna ytterligare under åren 1932 och 1938-39. Fortfarande slutade dräneringskanalen vid slukhålsområdet B. Sista sträckan fram till B var inte ens nedsprängd i berggrunden utan kalkhällen utgjorde botten i kanalen. Vid själva sluket hade dock en uppsamlingsbassäng sprängts för att öka slukens kapacitet.

1962 säger lantbruksingenjör Aspegren i ett utlåtande: "Markens ytsänkning nödvändiggör åter en sänkning av vissa avlopp i 1938 års företag och då huvudsakligen i företagets nedre del. Största delen av vattenföringen i huvudavloppets nedre del av-

bördas nämligen genom slukhål med utlopp vid Lummelunds bruk. Vid högvattenföringar kan dock erforderlig avbördning ej ske med mindre än att ett stort övertryck erfordras, vilket har till följd att stora delar av Martebo myr skadas genom översvämningar". Därmed bildades Martebo myrs dikningsföretag av 1962.

Arbetet utfördes mellan 1964 och 1970.

Kanalen byggdes nu ut ända fram till landsvägen, vid punkt A på översiktskartan, varifrån vattnet via trummor under vägen avbördas ner i den naturliga orörda strömfåran. Vid bron ligger kanalbottnen på 37,4 m ö h, och den stiger upp mot myren med 5 promilles lutning. Bottenbredden varierar mellan 4,5 och 5 meter.

Högsta vattenlinjen i Kanalen låg före sista utbyggnaden på 3,5 meter över bottnen vid slukhålsområde C, enligt dikningsföretagets ritningar, beräknat på en maximal vattenföring av $8,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Nu är högsta vattenlinjen vid samma vattenföring 1,6 m.

Fig.15 visar ett diagram över vattenföringen i Kanalen under åren 1958-62. Pegelmätningarna är utförda av Lantbruksnämnden i Visby i samband med förundersökningar för en eventuell kanalutbyggnad. I diagrammet syns en markant topp i slutet av april 1958. Vattenståndet var då 285 cm vilket motsvarar en vattenföring på $6 \text{ m}^3/\text{s}$ enligt en avbördningskurva till diagrammet (Andersson & Gusting 1962). Då slukhålens sammanlagda kapacitet vid denna tidpunkten var $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$ blev resultatet en översvämning.

Denna senaste utbyggnad av dräneringssystemet har i mycket hög grad förändrat Lummelundströmmens karaktär, och risken är stor att förändringarna med tiden kan bli katastrofala för det naturliga underjordiska dräneringssystemet. Aspegren nämner, i det tidigare citerade utlåtandet, att syftet med 1962 års företag bl a är "att hela avrinningen skall kunna avbördas ovan jord genom huvudkanalen". Så håller också på att bli fallet; med denna jämnt sluttande rymliga kanal har slukhålens roll i dräneringssystemet minskat och därmed dikningsföretagets intresse att hålla slukhålen öppna, med påföljd att allt mindre vatten kommer att strömma ner i de underjordiska grottsystemen. Se detaljerad förklaring nedan under rubriken Slukhål.

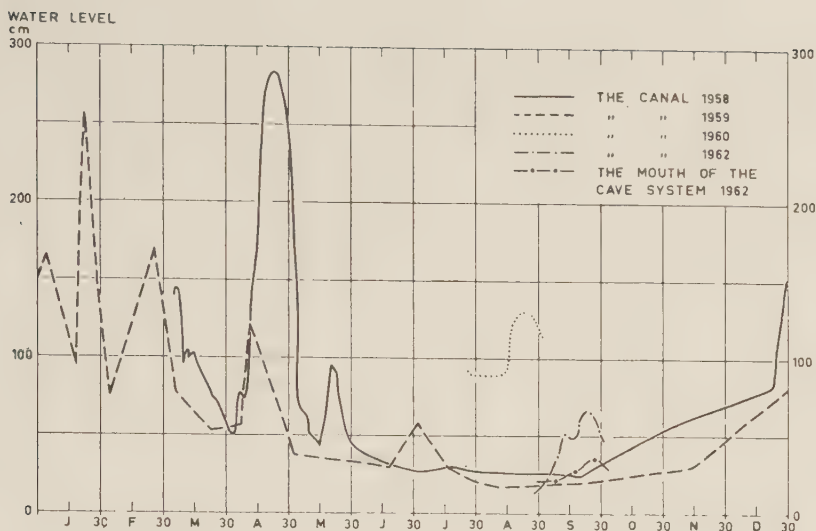


Fig. 15 Vattenståndet i Kanalen under fyra år (efter Andersson & Gusting 1962).

Men dikningsföretaget är sett från jordbrukets synpunkt lyckat. Översvämningensrisken är nu för tillfället eliminerad (marksjunkningen kan dock komma att medföra ökad risk för översvämning) och dräneringströskelns sänkning bör ha gett en något snabbare dränering av markerna efter snösmältningen.

Före utdikningen fungerade Martebo myr-komplexet som en stor reservoar för nederbörden. Lummelundagrottan bör därför aldrig ha sinat helt ens under de torraste sommarmånaderna. Ett talande bevis för att vattenströmmen ur grottmynnningen var mäktig och pålitlig är att strömmen samtidigt har drivit sex kvarnar på en gång. Fig. 16 visar en karta från 1696 där de sex kvarnarna är inritade. De flesta var sågkvarnar och 1620-28 var kapaciteten så stor att de försåg hela Gotland med sågvirke (Lundberg 1939). Idag har man svårt att föreställa sig detta när man ser den diminutiva rännil som sommartid rinner ut ur grottmynnningen.

Den effektiva dränering av Martebo myr, som nu föreligger efter upprepade sänkningar av dräneringströskeln, medför en snabb avrinning av vårflod och kraftigare nederbörd. Då marksjunkningen dessutom minskat volymen av den vattenhållande kärrtorv som utgör den dominerande jordarten i området, skulle

marken snabbt torka ut med bibehållen låg avrinningströskel. Detta problem har lösts med regleringsluckor i kanalerna, varav den viktigaste befinner sig 1,3 km uppströms (öster om) bron vid slukhålsområde C. När överskottsvattnet dränerats bort, höjes dammluckan till en höjd av max 1,4 m över kanalbottnen. Vid längre torka medför detta att inget vatten rinner över luckan och Lummelundastömmen blir helt torrlagd. Detta är förvisso ett från jordbrukets synpunkt nöjaktigt arrangemang, men från naturvårdens synpunkt är det raka motsatsen. Sommaren 1976 släpptes inget vatten ut från fördämningen under så lång tid att karstvattnenytan (den speciella grundvattenyta, som finns i karstifierad berggrund) hann sjunka till en nivå under 21,83 m ö h. Står karstvattnenytan under denna nivå rinner inget vatten ur Lummelundagrottan och Lummelundaåns nedre lopp är inte vattenförande.

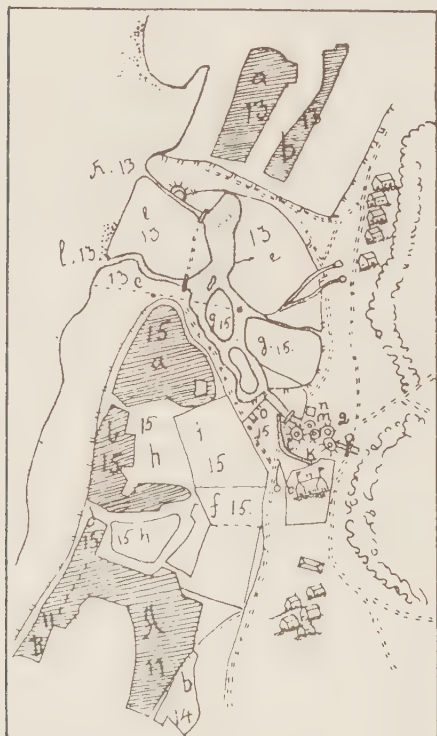


Fig. 16 Detaljkarta över Lummelunds bruk ur 1696 års skatteläggningsskarta av Gabriel Elephant (efter Lundberg 1939).

Vid Lummelundagrottans mynning (2) finns fem kvarnar markerade och längre ner mot kusten ytterligare en. De ofyllda cirklarna markerar källor.

För att eliminera risken av en uttorkning av vattenströmmen genom Lummelundagrottan, med de katastrofala följder detta skulle få för grottans djur och växtliv, bör ett minsta vatten-

flöde garanteras. Detta har uppskattats till 5 l/s. Denna avtappning behöver inte vara kontinuerlig utan kan tillgripas först när vattenflödet ur grottmynningen understiger 5 l/s. Lägsta uppmätta vattenföring under fältarbetet var 3,4 l/s och då var tillrinningen i översta slukhålet mellan 1,5 och 4 l/s. Enligt Knutsson (1974) fortsätter cirka 5 l/s att rinna ur grottan även sedan tillförseln till sluken upphört. 1976 konstaterade emellertid guiderna i grottan och markägarna att vattnet sinade helt. Tyvärr saknas tidsangivelse när Kanalen blev torrlagd, varför det fortfarande är ovisst hur lång tid det tar för karstvattnen att sjunka under nivån 21,83 m ö h, d v s då vattenflödet ur grottan upphör.

En väsentlig framtida uppgift är att upprätta ett diagram över flödet från de olika källorna efter det att vattentillförseln från myren brutits. En sådan mätserie skulle kunna ge besked om de underjordiska vattenmagasinens buffertvolym och även ge besked om tidpunkten då vatten måste tillföras sluken för att upprätthålla minimiflödet. Under våren 1978 tog dikningsföretaget upp en mindre tappningslucka i den stora dammluckan, men i vilken utsträckning denna kommer att användas för att släppa ut vatten under torrperioder är ännu inte klarlagt.

SLUKHÅL

Totalt har 33 separata slukhål påträffats under fältarbetet. Fig.13 visar slukens läge och ungefärliga former. Bokstäverna relaterar till de tre väsentligaste koncentrationerna av sluk, och motsvaras av samma beteckningar på översigtskartan, fig.3. Avsikten var från början att beräkna kapaciteten hos varje sluk, en uppgift, som så småningom visade sig var meningslös av två orsaker. För det första företog dikningsföretaget under slutet av sommaren 1977 en upprepning av kanalen medelst schaktmaskin varvid åtskilliga sluk begravdes och senare inte kunde återfinnas. Två nya sluk hittades som troligtvis varit tilltäppta tidigare. För det andra blev det uppenbart att sluken hade en stor förmåga att täppa till sig själva. Fig.17 visar en principskiss på hur detta går till. Ett större föremål spolats ner i sluket och fastnar där. Flera mindre föremål kommer sedan i sin tur att fastna och slutligen sker en full-

ständig tilltäppning av finare partiklar. Då vattnet står extremt högt i kanalen kan proppen lossna av vattentrycket. Detta fenomen har beskrivits av Jakucs (1977).

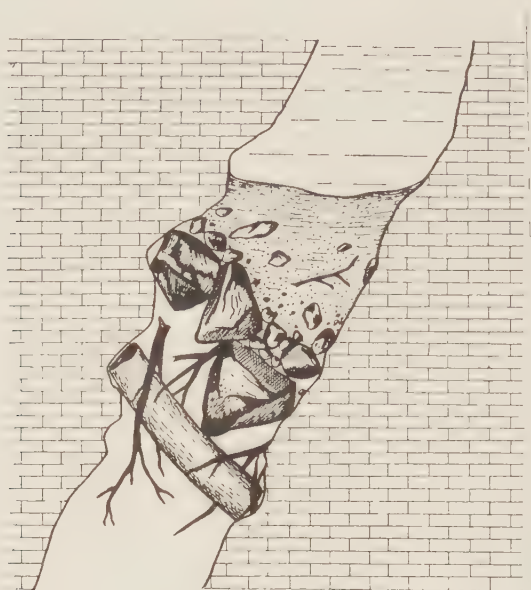


Fig.17 Skiss av hur ett slukhål kan täppas igen (efter Bögli 1978).

Andersson & Gusting (1962) beräknade slukhålens sammanlagda kapacitet till $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$, samma siffra anger Knutsson 1974. Detta är en mycket hög siffra, som dock styrkes av Gislén & Brinck (1948) då de säger att vårfloden sällan når fram till klintkanten vilket i sin tur betyder att allt vatten dränerades via sluken. En vecka efter vårflodens maximum 1963, var flödet i grottmynnningen $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$ (Knutsson 1974).

En ytterligare antydning om slukens tidigare stora kapacitet utgör följande citat från Stephens 1839: "Och i sanning är hela bäcken och marken till en ansevärd vidd full av hål, som mottaga vattnet vid hög flod, men då vattnet är litet, emottaga de första hålen allt vattnet, så att en stor del af bäcken är torr största delen av året". Slukhålen förmådde alltså ta emot allt vatten vid "hög flod". Talande är också en karta från 1696 (fig.18) där Lummelundaströmmens fåra enbart går fram till slukhålen, torrfåran mellan landsvägen och havet finns inte heller markerad, tvärtom är det utritat obrutna åkerfält där den idag rinner fram.

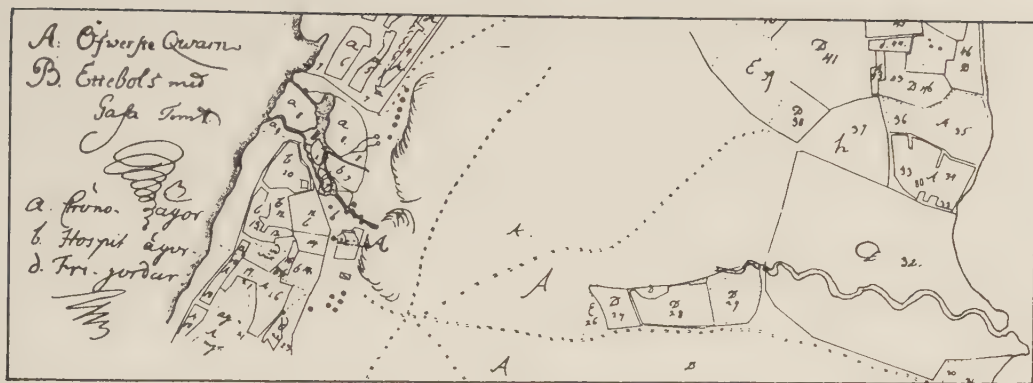


Fig.18 Karta över Lummelundaströmmen år 1696, från Martebo myr (Storträsk) till kusten (efter Lundberg 1939).

A = Lummelundagrottans mynning.

I november 1977 fick jag möjlighet att studera slukhålets kapacitet under en nederbördsrik period. Fig.19 visar situationen mellan den 18:e och 25:e november. Kurvorna i diagrammet visar vattenföringen i kanalen respektive utloppet, staplarna ner-till är nederbörden under samma tidpunkt. Datumet markerar kl 12 på dagen, nederbördsvärdena är avlästa kl 07 och härstammar från SMHI:s nederbördsstation i dräneringsområdet. Den 20:e ökade vattenföringen kraftigt i kanalen efter nästan 2 dygns regn. Sex timmar efter det att vattnet i kanalen stigit förbi slukhålsområde C började vattnet stiga i grottan. Ett dygn senare var vattenföringen i grottmynningen ca 1 400 l/s. Vid kontrollen 12 timmar senare hade den minskat till cirka 1 000 l/s och minskade sedan långsamt i två dygn. Som diagrammet visar sjönk däremot inte vattenståndet i kanalen under samma tidsrymd. Istället trängde vattnet allt längre västerut i kanalen och hade vid middagstid den 22.11 nått ända fram till slukhålsområdet A.

Dagen efter var vattenföringen något mindre i kanalen, men trots detta var sluken vid A mättade och vattnet rann nu under landsvägsbron ner genom torrdalen och ut i havet. Detta har enligt tidigare beskrivningar varit något mycket sällsynt, vilket man kan förstå eftersom sluken har kunnat ta emot $5,5 \text{ m}^3$ per sekund. Men vid detta tillfälle var den totala vattenföringen knappt $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$, och ändå nådde Lummelundaströmmen fram till sin gamla fåra, om än bara med några tiotal l/s.

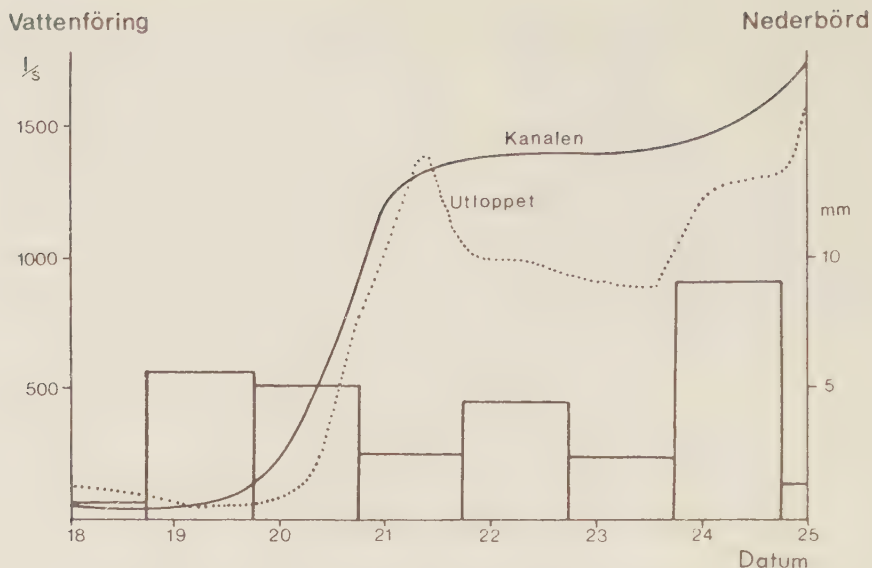


Fig.19 Vattenföringen i Kanalen och i utloppet vid grottan under tiden 18.11 - 25.11.1977. Staplarna markerar nederbördsmängden under samma period. Strecket vid utsatt datum markerar kl. 12 på dagen.

Den 24:e steg emellertid åter vattnet i grottnynningen samtidigt som vattnet i kanalen drog sig tillbaka till sluken vid A utan att vattenföringen i kanalens övre del minskade. Den logiska förklaringen bör vara att en propp i ett av de större sluken vid B eller C, lossnade. Samma slutledning har Andersson & Gusting dragit efter en längre mätserie med peglar i kanalen och vid mynningen. En snabb sänkning av vattenståndet i kanalen motsvarades cirka 8 timmar senare av en ökning i vattenföringen i grottnynningen.

Av ovanstående framgår att slukhålens kapacitet idag är långt mindre än 1959 (det år då Andersson & Gusting baserat sina beräkningar på). Den senaste utbyggnaden av kanalen åstadkom en jämnt sluttande bred dräneringsfåra, som lätt leder bort vattnet med en markant sänkning av högsta vattenlinjen som följd, från 3,5 m till 1,6 m vid sluken B - C enligt entreprenörens ritningar från 1970. Detta medför att något högre hydrostatiskt tryck inte kan byggas upp och att slukhålens självrensande förmåga därför starkt begränsas. Dessutom rensas

slukhålerna numera inte av markägarna, vilket förr var nödvändigt för att förhindra översvämningar. Resultatet har blivit att slukhålerna succesivt täpps igen. Gislén & Brinck beskriver 1948 två sluk cirka 100 m öster om sluken vid C, dessa har ej kunnat återfinnas. Figur 20 visar slukhålerna vid C år 1945 enligt samma författare. Trots noggranna undersökningar har jag inte heller återfunnit eller vid högvatten kunnat påvisa sluken a - c. Dessa har förmodligen täppts till så effektivt att de inte längre är aktiva. Det tidigare stora sluket "Kamsmygen", i fig.20, har under hela undersökningsperioden, 1977-79, varit helt tilltäppt.

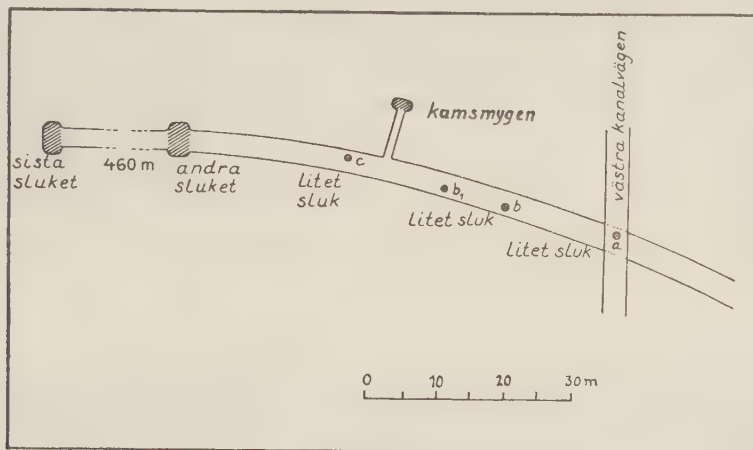


Fig.20 Detaljkarta över slukhålsområde C i Kanalen enligt Gislén & Brinck 1948. Sluken a, b, b¹ och c har ej återfunnits 1977-80.

Bild 11 visar slukhålet längst till vänster vid 5 i fig.13. Under en enda natt i oktober 1977 täpptes detta sluk till av trädgrenar, gräs, vass och jordpartiklar. Bild 12 visar samma sluk en timma senare. Observera att det nu inte finns något vatten till höger (nedströms) om sluket. Tidigare stod vattnet 16 cm över kanalbotten och nådde fram till nästa sluk vid punkt 6. Efter rensning förmådde sluket ta emot allt vatten. Ovanstående belyser vad som sannolikt håller på att ske med sluken i Kanalen. Om inte åtgärder vidtages kommer den subterrana dräneringen troligen att minska alltmer med åren med åtföljande risk för uttorkning av Lummelundagrottan.



Bild 11. Igentäppt slukhål i Kanalen, inget vatten rinner ner i sluket. Foto Leif Engh.



Bild 12. Samma sluk som ovan en timma senare efter manuell rensning. Sluken tar nu emot allt det vatten som tidigare rann förbi. Foto Leif Engh.

SLUKHÅLENS KAPACITET

En mätning av de enskilda slukens kapacitet skulle vara tämligen tidsödande då det bl a skulle kräva en ordentlig upprensning av varje sluk. De beräkningar, som gjorts under fältarbetet, har dessutom varit mycket motsägelsefulla beroende på den igensättning och öppning av sluken som tidigare beskrivits. Nedanstående är därför en sammanställning av de högsta erhållna värdena av mätningar under vecka 47 år 1977, då vattenföringen var hög. Flygelmätningarna utfördes upp- och nedströms om slukhålsområdena A, B och C (se fig.13).

Sluken vid C:	430 l/s
Sluken mellan B och C:	164 l/s
Sluken vid B:	727 l/s
Sluken mellan A och B:	80 l/s
Sluken vid A:	325 l/s

Det bör observeras att värdena ej kan jämföras inbördes då de avser maximala erhållna värden under mätningar vid olika tillfällena under veckan. Men ser vi dem som maximala värden för slukhålets kapacitet finner vi att de då tillsammans förmådde sluka 1 725 l/s d v s maximalt $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Denna siffra skall jämföras med de $5,5 \text{ m}^3/\text{s}$ som var slukhålets kapacitet i slutet av 1950-talet enligt Andersson & Gusting.

KARSTKÄLLOR

I det undersökta området finns 6 karstkällor av betydelse. I kapitlet Karstformer omnämnes visserligen ytterligare källor, men tre av dem ligger utanför det intensivundersökta området och har ingen vattenföring att tala om, utan det rör sig här snarare om framsipprande vatten. En annan källa lär ligga under herrgårdsbyggnaden och har ej kunnat undersökas. Källan finns markerad på kartan från år 1696, se fig.18.

På detaljkartan, fig.4, är källorna markerade med siffrorna 1 - 6 från höger till vänster, nedtill på kartan. Denna num-

rering användes hädanefter i texten.

Källa nr 1 ligger i södra hörnet av parken på 12.0 m ö h. Källan har nästan begravts av schaktmassor men är fortfarande aktiv. Denna källa är vattenförande året runt, även under mycket torra perioder. Vattenföringen tycks inte heller påverkas av riklig nederbörd utan den är i det närmaste konstant och ligger på 0,4 l/s. Just det faktum att flödet är konstant skiljer källan från de andra fyra i området. Troligen rör det sig här inte om vatten, som rinner fram i öppna sprickor, utan det är snarare ett långsamt cirkulerande grundvatten. Det senare styrkes av att vattnet alltid är helt klart och temperaturen konstant 7.1°C.

Källa nr 2 är Lummelundagrottans mynning. Tröskeln för vattnets tappning ur grottan ligger på 21,83 meters höjd över havet. Vattenföringen varierar numera, enligt muntliga uppgifter från markägarna, från inget flöde alls under extrem torka, till knappt två m³/s under vårflödet. Före utbyggnaden av kanalsystemet enligt "Martebo myrs Dikningsföretag 1962" var den minimala vattenföringen cirka 5 l/s och den maximala 5,5 m³/s enligt Andersson & Gusting (1962) och Knutsson (1974). Under fältarbetsperioden konstaterades vattenflöden mellan 3,4 l/s och 1 450 l/s. Vattenföringen är direkt beroende av vattenföringen i kanalen och slukhålens tillfälliga kapacitet. Figur 21 visar situationen den första veckan i oktober 1977. De första mätningarna genomfördes vid middagstid den 1.10 därefter mättes vattentemperatur och flöde tre gånger dagligen. Lufttemperaturen registrerades av en termohydrograf och nederbördsstatistiken härrör från SMHI:s station i dräneringsområdet. Diagrammet visar två markanta toppar i vattenföringen föregångna av två nederbördstoppar. Ökningen i vattenflödet börjar cirka 2,5 dygn efter att nederbörden inträffat. Dett är dock ingen generell regel. I november när det regnade nästan dagligen och markerna var vattenmättade dröjde det endast 12 - 24 timmar innan ökningen satte in. Då det alltså är dräneringsområdets kondition, som till stor del avgör tidsförskjutningen mellan regn och ökad vattenföring i källan, går det inte att ställa upp något generellt samband. En mätserie under de olika årstiderna, med flera olika situationer krävs för att upprätta ett dylikt schema.

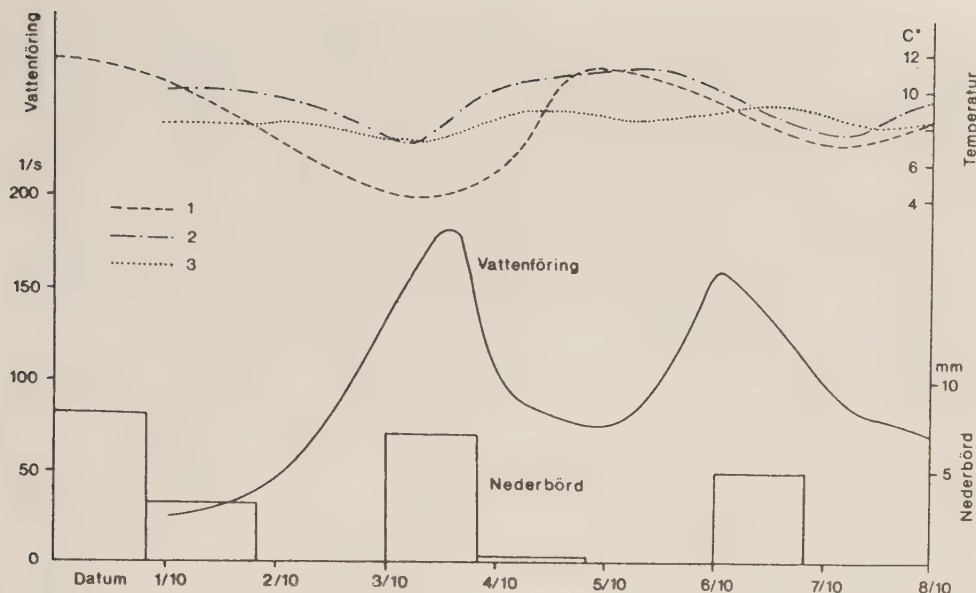


Fig.21 Vattenföringen i Lummelundagrottans mynning den 1.10 - 8.10.1977.

1 = atmosfärens temperatur

2 = vattentemperatur i slukhålen

3 = vattentemperatur i utloppet

Staplarna visar nederbörden i området, datumstrecket markerar kl 12.

Längst upp i fig.21 har vatten och lufttemperatur avsatts. Då vattenföringen stiger den 3.10 sjunker temperaturen i vattnet. Detta är ett fenomen, som inträffar då vattenföringen varit låg (under cirka 60 l/s) en längre tid och därpå ökar kraftigt. Andersson & Gusting samt Tell har också noterat detta fenomen i Lummelundagrottan. Vid en låg vattenföring är omröringen liten i de stora vattenmagasin, som finns mellan sluk och utlopp (Knutsson 1974) och det inrinnande varmare vattnet kan till viss del rinna genom grottssystemet som ett varmare yt-vatten. Ökar vattenmängden plötsligt sker en omröring i bassängerna och det där stående 7,0 gradiga vattnet (den temperatur som de kända bassängerna och själva grottan har vid extremt låg vattenföring) blandas med det inströmmande vattnet. Har inloppsvattnet då en temperatur något över 7° (som situationen var den 1.10 - 3.10 enligt fig.21 får vi en sänkning av tempera-

turen i utloppsvattnet. Generellt kan sägas att inloppsvatten varmare än 7°C kyls ner i grottsystemet, medan inloppsvatten med en temperatur under 7°C värms upp samt att det är mängden vatten, som per tidsenhet strömmar genom grottan, som avgör hur stor temperaturförändringen blir.

Från mitten av november var vattentemperaturen i sluket under flera dagar betydligt lägre än 7°C . Utloppsvattnets temperatur understeg emellertid inte $7,0^{\circ}\text{C}$ förrän den 25.11 då den sjönk till $6,0^{\circ}\text{C}$ vilket var en följd av att det då femgradiga inloppsvattnet strömmade genom grottan på bara några timmar ($Q = 1\ 400\ \text{l/s}$).

Den 20.2 1950 uppmättes en vattentemperatur i grottmyningen på $2,1^{\circ}\text{C}$ enligt Gislén & Brinck (1950). Det var under en intensiv snösmältningsperiod med hög vattenföring (av beskrivningen att döma bör den ha varit mer än $2\ \text{m}^3/\text{s}$) och en temperatur på $0,8^{\circ}\text{C}$ i inloppsvattnet. Författarna nämner att den låga temperaturen på utloppsvattnet var ett "rare and occasional minimum", vilket är riktigt om de därmed menade att så låga utloppstemperaturer endast kan förekomma under intensiva snösmältningsperioder. Numera bör dock så låga utloppstemperaturer överhuvudtaget inte kunna uppträda såvida en upprepning av slukhålen ej sker.

Under snösmältningen i mars 1978 låg temperaturen i inloppet under 1°C medan den i utloppet inte gick under $3,5^{\circ}\text{C}$.

Källa nr 3 bearbetades under sommaren 1977 av markägaren med en grävskopa varvid den flyttades en bit bakåt i branten. Den springer nu direkt ut ur en vertikal kalkvägg via flera sprickor och skiktfogar på en höjd av 11,8 m ö h. Källan står under hydrostatiskt tryck och vattenföringen i den varierar på samma sätt som i källa 2, dock tycks den maximala vattenföringen bara uppgå till 13 l/s. Vid denna maximala vattenföring sprutar vattnet ut ur sprickorna i branten (bild 13) och vatten sipprar fram i småsprickor som är belägna ända upp till 1,8 m över källans huvudmyrning. Vattnet var vid dessa tillfällen grumligt, liksom vattnet i Kanalen, vilket kan tyda på en direkt förbindelse med slukhålen.



Bild 13. Källa nr 3 vid stor vattenföring. Vattnet rinner under tryck ut ur marken på flera olika nivåer. Foto Mischa Gavrusjov.



Bild 14. Artesiskt vatten vid källa 5 när denna är aktiv. Huvudkällan längst ner till höger i bilden. Källa 4 nedanför pilen och bortom bilen. Foto Leif Engh.

Källa nr 4 står också under tryck, högsta uppmätta vattenföring var 12 l/s. Källan springer fram i en sluttning mellan två träd på en höjd av 14,3 m ö h mitt i en torrfåra. Denna torrfåra börjar vid källa 5, som ligger cirka 20 m ö h. Källa 5 är endast vattenförande vid extremt stor vattenföring i kanalen när vattnet når fram till slukhålsområdet A.

Den 22.11.1977 började det strömma vatten ur källa 5 och dagen efter rann det fram cirka 330 l/s. Vattnet steg artesiskt rakt upp ur marken i fyra kraftiga strömmar och ett flertal mindre inom en yta på 15 x 15 m. Marken utgöres här av utjämnat ras-material från klinten och vattnet sökte sig nu upp mellan blocken. När flödet var som störst var nivåskillnaden mellan den högsta och lägsta punkt där vatten trängde upp ur sluttningen 2,4 m.

Vattnet i båda källorna var starkt grumligt, dock blev källa 4 grumlig först i samband med att vattnet i kanalen nådde fram till slukhålsområdet A. Av detta kan man dra slutsatsen att båda källorna står i direkt förbindelse med sluken och eventuellt också med varandra. Men källa 4, som var aktiv vid alla besök är inte bara beroende av vatten från de nedre sluken utan tappar förmodligen vatten ur grundvattenakvifären.

Bild nr 14 är tagen ner över källorna vid 5 när flödet var cirka 200 l/s. Huvudkällan är belägen i nedre högra delen av bilden och från den går numera ett grävt dike (före sommaren 1977 en naturlig grund torrfåra) fram till källa 4, som ligger bortom bilen i fotot. En bit utanför vänstra kanten av bilden ligger den igenfyllda grottmynning, som kan vara det ursprungliga utloppet för den kraftiga vattenström som under högvatten i Kanalen nu rinner fram ur källorna vid 4 och 5 (se under rubriken Grottor i kapitel 3).

Källa 6 är som tidigare nämnts en troligtvis återuppstånden källa som förmodligen varit inaktiv under en längre period fram till våren 1979 då den hade en högsta vattenföring på 2 l/s. Sommaren 1979 var källan fortfarande aktiv men då enbart med ett vattenflöde understigande 0,5 l/s. Källan är belägen på 16,0 meters höjd över havet.

SAMBAND MELLAN KÄLLOR OCH SLUKHÅL

Redan Gislén & Brinck konstaterade att sluken vid C hade förbindelse med utloppet. De använde sig av färgade korksmulor, som släpptes ner i sluket. Några veckor senare återfanns enstaka korkbitar i det nät de spänt över utloppet. De gjorde även försök med färgämne, 20 g fluorescin, som p g a den stora utspädningen dock aldrig kunde spåras.

Lundevall (1964) fann vid sin undersökning mycket starka samband mellan växter vid slukhålerna och växter kring Lummelundagrottans mynning. Han fann dessutom att flera av de vattenlevande djuren i grottan även fanns i Kanalen. Dessa båda fakta menade han utgjorde bevis för slukens förbindelse med vattenströmmen ut ur grottan.

1962 genomförde Knutsson m fl spår försök med radioaktiva isotoper. ^{51}Cr -EDTA injicerades i slukhålsområde C, tre dagar senare påvisades spårämnet i vattnet i grottans yttre delar. Samma försök, med samma resultat, upprepades av I Eriksson (Knutsson 1974) våren 1963.

I fig.22 finns egna vattenföringsmätningar från fyra olika perioder redovisade. Vid de tre första mätperioderna försvann vattnet under jord i sluket vid C. Mätningarna visar ett klart samband mellan sluk och utlopp, dock med en viss förskjutning vid låg vattenföring. Andersson & Gusting konstaterade ett likadant samband 1962 med hjälp av pegelregistrering vid sluk och grottmynning.

Vid den fjärde mätperioden försvann vattnet under jord från slukhålsområde B och uppströms. Som diagrammet visar är överensstämmelsen god mellan vattenföringarna. De skillnader, som finns kan härröra från mätfel eller från infiltrationsvatten. Mätningarna i utloppet bör också ha större felmarginal då strömfåran där ej har en symmetrisk profil vilket försvårar beräkningarna. Slutledningen av denna mätserie är att samtliga sluk i och mellan slukhålsområde B och C står i förbindelse med vattendraget i Lummelundagrottan. Undersökningar i grottan vid högvatten med färgämne har visat att vattnet från sluken vid B förenar sig med huvudströmfåran från slukhålsområde C cirka 300 m innanför grottmynningen.

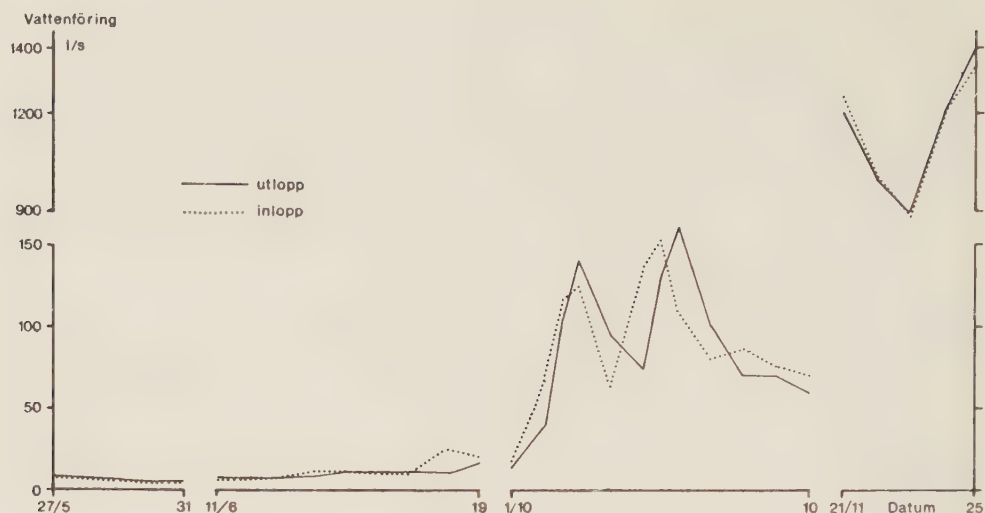


Fig. 22 Vattenföringen i Kanalen och Lummelundagrottans mynning under fyra olika perioder 1977.

Vattnet från slukhålsområdena B och C nyttjas av olika konsumenter vilket omöjliggjorde spårförsök med färgämne i större skala. Så förmodades ej vara fallet med sluken vid A där större mängder färg användes (numera utnyttjas vattnet därifrån, via källorna, till en fiskodling). Vid första försöket, november 1977, löstes 0,5 kg Rhodamin B upp och hälldes i strömfåran strax före sluken vid A. I samtliga källor monterades nylonnät-påsar innehållande aktivt kol.

Efter 105 minuter var vattnet i källa 5 rödfärgat. Vattenföringen var 190 l/s. Då avståndet fågelvägen endast är 300 m mellan sluk och källa tyder denna fördröjning på förekomsten av större underjordiska bassänger eller ett långt kanalsystem. Ett senare försök vid vattenföringen 225 l/s visade en fördröjning av 100 minuter.

I källa 3 observerades aldrig någon färgning av vattnet. Det aktiva kolet från denna källa undersöktes senare medelst lakning och spektrofotometer. Resultatet var negativt vilket troligen betyder att denna källa ej står i förbindelse med sluken vid A utan med något av de mindre sluken mellan A och B - grumlingen i källan under högvattnet hösten 1977 visar att en förbindelse bör finnas med Kanalen.

Inte heller källorna 1 och 2 hade något färgämne i kolet. Detta hade däremot kolet från källa 4 varför denna källa liksom källa

5 står i förbindelse med sluken vid A.

Tabell 2 Kemiska och fysikaliska egenskaper i Lummelundagrottans vatten

Variabler	Max.värde	Min.värde	Anmärkning
Totalhårdhet, mg/l	578	245	MgCO ₃ = 2-5%
Kloridhalt, mg/l	36	24	Lundevall 1964
Fosfathalt, mg/l	0	0	
Nitrithalt, mg/l	0,1	0	
Nitrathalt, mg/l	40	0	
Suspenderat mtrl.mg/l	1 783	0	
Glödningsrest, mg/l	1 092	295	
KMnO ₄ -förbrukning	92	54	Gislén & Brinck 1948
Temperatur, °C	8,6	2,1	Gislén & Brinck 1948
pH	8,1	6,9	

VATTNETS KEMISKA OCH FYSIKALISKA EGENSKAPER

Vattnet i Lummelundaströmmens utlopp ur grottan har analyserats fortlöpande under undersökningen med avseende på karbonhalt, pH, temperatur, grumlighet och färg. Vissa analyser har tidigare utförts av Gislén & Brinck, Andersson & Gusting samt av Lundevall.

Generellt kan sägas att vid låga vattenföringar är vattnet klart med en svagt brun färg av humus, vid höga vattenföringar kan vattnet vara grumligt av lerpartiklar men blir färglöst då dessa fått sedimentera. Vattnet i källa 1 är alltid klart och färglöst samt har en konstant temperatur. Av de övriga källorna varierar temperaturen mest i nr 2, se förra kapitlet.

I tabell 3 redovisas erhållna max och minimivärden, om värdet ej härrör från egna analyser anges källan inom parantes. Karbonhalt och pH finns redovisade i detalj i bilaga 2.

Kommentar till tabell 2:

Järnhalten har vid nästan alla provtillfällen legat vid det nedre värdet.

Fosfat påvisades aldrig trots att detta förväntats, Anledningen var en utredning utförd av Arrhenius (1938) där han konstaterade att jorden i en del av betfälten i dräneringsområdet hade

en hög halt av fosfat.

Nitrathalten är högst strax före snösmältningen. Värdet 0 har erhållits under sensommar och vinter.

Den höga halten suspenderat material uppmättes vid den kraftiga vattenföringen i november 1977. Mängden suspenderat material förefaller normalt vara väsentligt lägre, vårfloden 1978 höll enbart 180 mg/l.

TOTALAVRINNINGEN

Med totalavrinning, även kallad effektiv avrinning, menas här den totala mängd vatten som dräneras bort från hela nederbördsområdet. Årsmedelnederbörden minus evapotranspirationen ger årsmedelavrinningen. För att erhålla ett exakt värde på evapotranspirationen borde denna mätas med evapotranspirometer i dräneringsområdets olika markytor under en hel årscykel (Lindh 1972). Ett närmevärde kan dock erhållas genom Tamms formel (Ångström 1974).

E = evapotranspirationen

$$E = T \times 30 + 221$$

T = årets medeltemperatur

Då medeltemperaturen är 7,1°C blir evapotranspirationen 434 mm. Minskas årsmedelnederbörden, 554 mm, med denna mängd erhålles 120 mm vilket är den årliga totalavrinningen. Omvandlat till årsgenomsnitt för hela nederbördsområdet blir detta 258,7 l/s. Årsmedelvattenföringen angavs 1969 av VIAK till 400 l/s. Förmodligen är denna betydligt högre siffra beräknad på de pegelmätningar, som genomfördes 1958-62 (det anges ej vad beräkningarna är grundade på). Av dessa pegelmätningar var det bara under 1958 som en hel årscykel mättes, underlaget är därför ej tillräckligt för att fastställa den genomsnittliga årsmedelvattenföringen.

I Ångström (1974) anges evapotranspirationen för Visby till 422 mm, alltså ett något lägre värde än det här beräknade. Tyvärr framgår det inte heller här hur beräkningarna utförts. Av dessa anledningar användes i fortsättningen det ovan genom Tamms formel beräknade värdet.

All avrinning från det aktuella nederbördsområdet sker inte via Lummelundaströmmen. De mindre källorna i området beräknas ha en sammanlagd årsmedelvattenföring på cirka 6 l/s, då enbart medräknat det vatten som ej härrör från slukhål i Kanalen. Den eventuella avtappning som sker via submarina källor har ej beaktats.

Den här beräknade siffran på totalavrinningen, 258,7 l/s, är ett årsmedelvärde. Avrinningens fördelning över året är ej utredd i detalj, men i grova drag kan sägas att huvuddelen av vattnet dräneras bort under oktober till april (se fig.15 och 23). Under maj - september är avrinningen betydligt lägre än årsmedelvärdet. Mätningar och observationer utförda 1977-80 visar på ett ungefärligt medelvärde av 10 l/s för dessa månader.

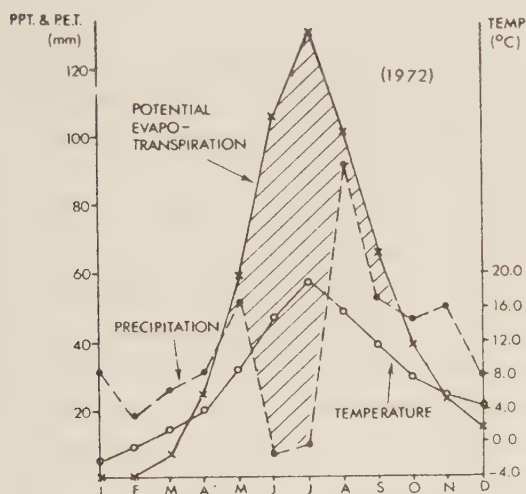


Fig. 23A Förhållanden mellan nederbörd, temperatur och potentiell evapotranspiration år 1972 för Gotland (efter Jansson & Succhetto 1978).

Den låga avrinningen sommartid är delvis avhängig en relativt liten nederbörd i juni och juli, men till största delen beror den på en hög evapotranspiration. Fig. 23A visar förhållandet mellan evapotranspirationen och nederbörd år 1972. Enligt figuren är evapotranspirationen högre än nederbörden under tiden maj - september. Nu är detta enbart ett teoretiskt förhållande, som förutsätter en jämnt fördelad nederbörd under perioden. Då regnet i verkligheten faller vid enstaka tillfällen hinner vattnet tränga ner i marken där det lagras. En del av detta markvatten rinner av från området via dränerings-

kanalerna - det är denna mängd som uppskattas till cirka 10 l/s i genomsnitt för sommarmånaderna. Hade den tidigare nämnda dammluckan ej funnits skulle avrinningen varit betydligt större vilket i sin tur medfört ökad uttorkning av markerna.

I dräneringsområdet har en damm på 0,18 km² anlagts. Dammen rymmer 300 000 m³ vatten varav 285 000 m³ får användas till bevattning under sommartorkan. Denna omfördelning i tiden medför att större delen av detta vatten försvinner via evapotranspiration istället för att rinna bort från dräneringsbassängen. Den mängd som därmed avgår från avrinningen motsvarar 1 mm nederbörd.

GRUNDVATTNET

Vattnet i karstifierad berggrund har diskuterats intensivt sedan slutet av 1800-talet. Helldén (1974) har sammanställt de väsentliga teorierna om grundvattnets cirkulation och korrosiva verkningar i kalkberggrund.

En av problemställningarna är hur vattnet uppträder i karstifierad berggrund. Vattnet kan strömma fram i underjordiska kanaler både över, under och i grundvattenytan - om en homogen sådan överhuvudtaget existerar i området. Ett av de stora problemen har nämligen varit att definiera grundvattenytan i karstterräng. Stringfield & Rapp (1977) sammanfattar rådande åsikter om grundvattenytor i karstlandskap enligt följande: vattenytan i en vattenmättad zon där ytan antingen står eller inte står under artesiskt tryck. Råder artesiska förhållanden benämnes ytan potentiometrisk eller pietzometrisk.

Ovanstående är egentligen en koncentration av de två huvudteorier som utvecklats inom karsthydrografen. En pietzometrisk grundvattenyta har varierande nivåer med varierande artesiskt tryck. Detta beror på att karstkanalerna fungerar som kommunicerande kärl med olika vertikal utbredning i berggrunden.

Denna grundvattenyta förefaller mestadels uppträda i veckad kalksten (bergskarst). Den andra typen av grundvattenyta har en mera enhetlig nivå där nivån bestäms av erosionsbasen, t ex havsytan. Företrädesvis uppträder sådana grundvattenytor i mer eller mindre horisontellt lagrad kalksten (låglandskarst). Se även sidan 258 om karsthydrologiska teorier.

Framledes i texten kommer beteckningen "karstvattnenytta" att användas. Begreppet karstvattnen skapades av Grund (1903). Det finns åtskilliga åsikter om definitionen på karstvattnen, men med karstvattnenytta, i fallstudien Lummelunda, syftar jag på Grunds ursprungliga definition: "det vatten som rör sig i den mot erosionsbasen fallande grundvattnenytan". Då karstvattnet, även enligt moderna teorier, är aggressivare än underliggande grundvattnen sker en snabbare lösning av kalken i denna zon. Fig.23B visar grundvattnenytans läge från kusten, över Lummelundagrottans mynning upp till cirka 200 m från Martebo myrs forna gräns vid Kanalen. Bokstäverna K, G, F, X, M, N och O markerar vanliga borrhållade brunnar. M och D markerar brunnar borrhållade ner i Lummelundagrottan. L utvisar grottans mynning. Brunn X är belägen cirka 400 m norr om orienteringskartans ram. Varje markerad punkt har avvägs från fixpunkt. Vattenytans läge för G, F, M, N och O har hämtats från borrhållprotokoll erhållna från brunnsarkivet i Uppsala. I brunnarna H, X, D och K har djupet till vattenytan mätts med elektrisk sond (beskriven i kapitel 8). Arbetet utfördes i oktober 1980 av naturgeografistuderande Lars Lind, Ulrik Mårtensson, Katarina Olsson och Kerstin Pilgård under min ledning.

Figuren visar att grundvattnenytan i brunnarna M, N, O och X faller utefter en rät linje som utdragen sammanfaller med basen i Lummelundagrottans mynning. Dessutom ligger den underjordiska Lummelundaströmmens yta i borrhållen M och D helt i nivå med denna linje. Detta finner jag vara starka indicier på att den lokala grundvattnenytan korresponderar med karstvattnenytan i området. Grundvattnenytan är i så fall inte pietzometrisk utan av den typ som är vanlig i låglandskarst.

Fig.23B visar också att landklingens bas, = Lummelundagrottans mynning, för närvarande tycks utgöra en lokal basnivå för grundvattnenytan. Att så är fallet indikerar också de permanenta källorna omedelbart framför klinten.

Grundvattnenytans läge nedanför klintbasen varierar starkt längs en sträcka av 1,5 km längs kusten. Detta beror förmodligen på de stora vattenuttag som görs till en minkfarm och två fiskodlingar i området. I en nyupptagen brunn, 390 m NNV grottmynningen, låg t ex vattenytan 13 m under havsytans nivå den 7.10.1980.

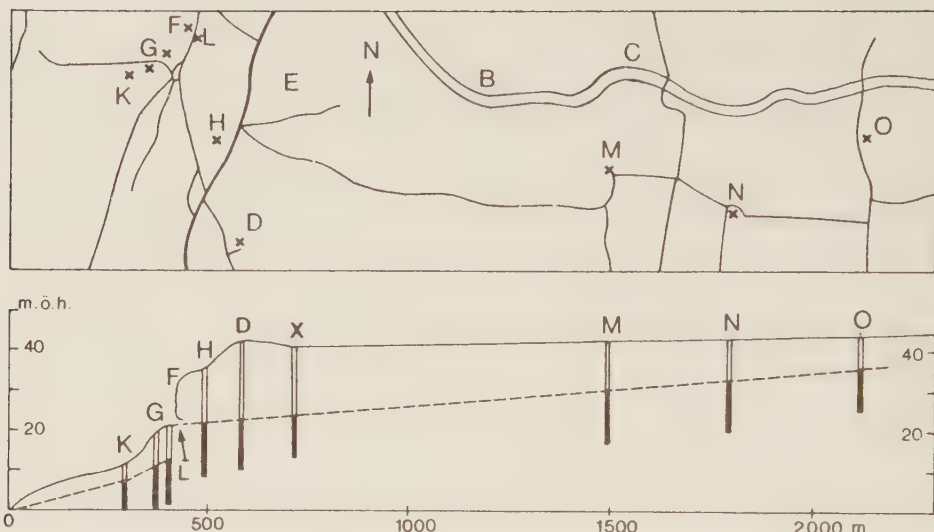


Fig. 23B Överst: Orienteringskarta med Kanalen och vägar inlagda.

L = Lummelundagrottans mynning

B och C = slukhålsområden i Kanalen

Övriga bokstäver visar läget på undersökta brunnar.

Undre fig.: Brunnar med vattenytan inlagd.

Streckad linje = grundvattenytan. Längdskalan gäller för orienteringskartan.

6. KARSTLANDSKAPETS UTVECKLING

DENUDATIONSBERÄKNINGAR OCH MORFOMETRI

Få landskap är så lämpade för processforskning som de där berggrunden utgöres av karstifierbara bergarter. Med relativt enkla metoder kan man få en uppfattning om hur snabbt landskapet bryts ner av de geokemiska processer, som generellt sett dominerar nedbrytningen av bl a karbonatbergarterna.

I början av 1950-talet presenterades de första arbetena om den kemiska denudationen i karstlandskap (Trombe 1952, Corbel 1952). I korthet går metodiken ut på att bestämma den mängd karbonater som lösta i vatten transporteras bort från ett karstområde.

Metoden har efterhand utvecklats av forskare världen över. 1969 introducerades en metod att kvantitativt analysera karstlandskap (Williams). Denna morfometriska analysmetod kompletterar den hydrokemiska och gör det möjligt att på ett kompakt och någorlunda exakt sätt jämföra olika karstlandskap med varandra. Denudationsberäkningar baserade på vattenanalyser ger ett mått på hur snabbt landskapet eroderas via kemisk utlösning (korrosion) av berggrunden. Morfometriska analyser ger en uppfattning om hur korrosionen har format landskapet, hur dränerings-systemet ser ut och hur karstformerna är fördelade i landskapet. Morfometrin kan också ge ett mått på hur karstifierat ett landskap är (förkarstningsintensiteten) vilket kan bidra till bedömning av karstlandskapets ålder.

I föreliggande arbete har ett försök gjorts att utnyttja också morfometrin för beräkning av denudationen.

LÖSNING AV KALKSTEN I VATTEN

Då Helldén (1974) har gjort en utmärkt sammanställning över processer i samband med den hydrokemiska lösningen av kalkstenar nöjer jag mig här med en kort sammanfattning.

Ett rent vatten som ej står i förbindelse med atmosfären för-
mår lösa 12-14 mg CaCO_3 per liter vatten (mg/l = ppm) vid 10°C . Om vattnet står i förbindelse med atmosfären, vilket är det naturliga förhållandet, kommer koldioxid att lösa sig i vattnet och bidra till lösningen av kalk så att 74 ppm kan lösas vid en temperatur av 10°C . Av detta framgår att den i vattnet lösta koldioxiden är av stor betydelse vid kalkens utlösning.

Ett schema, utarbetat av Bögli (1960), visar hur kalkutlösningen sker i fyra steg (fig.24). I första steget reagerar vattnet med kalken utan hjälp av koldioxid. I andra steget är det den i vattnet kemiskt lösta koldioxiden som reagerar. Fas 1 och 2 sker sekundschnabbt och samtidigt. I tredje och fjärde faserna är det den fysikaliskt lösta koldioxiden som reagerar. I schemat finns en tidsskala inlagd som visar tidsförloppet för de olika faserna. Under tidsskalan finns en kolumn "Amount of solution", här avses ej den totala mängden utan hur mycket material som omsättes per sekund. Trots att omsättningen per sekund är 1 000 - 10 000 ggr större i de första tre faserna är

det under fas 4 som huvuddelen av karbonatutlösningen sker (Helldén 1974).

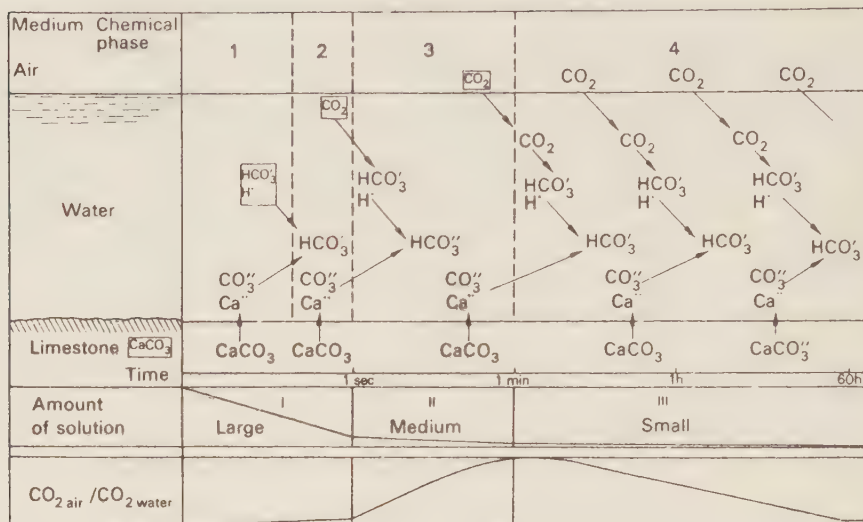
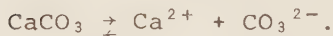


Fig. 24 Schema över lösningsförloppet vatten - kalksten (efter Bögli 1978).

Fas 1:

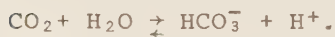
Kalciumkarbonat löser sig direkt i vattnet utan inverkan av koldioxid. Förloppet kan beskrivas med formeln,



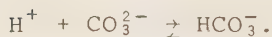
När jämvikt uppnås inom loppet av en sekund har 10 ppm CaCO₃ per liter vatten gått i lösning (vid en temperatur på 6,7°C). Denna reaktion är temperaturberoende så att vid 25°C går 14,3 ppm CaCO₃ i lösning.

Fas 2:

Den koldioxid som finns löst i vattnet bildar kolsyra enligt formeln,



De vätejoner som därvid bildas reagerar med de karbonatjoner som bildats under fas 1,



Jämviktslägen i fas 1 störs därmed vilket medför att mera kalk går i lösning för att bilda nya karbonatjoner.

Fas 3:

Större delen av vattnets koldioxidinnehåll är fysikaliskt löst. Jämvikten mellan den kemiskt och fysikaliskt lösta koldioxiden störs under fas 2. För att upprätthålla jämvikten går fysikaliskt löst koldioxid i lösning (kemiskt) under bildandet av $\text{HCO}_3^- + \text{H}^+$.

Återigen upprepas reaktionsförloppen från fas 2 och 1. De under 3:e fasen nytillkomna vätejonerna reagerar med CO_3^{2-} och möjliggör ytterligare lösning av CaCO_3 .

Fas 4:

Genom att fysikaliskt löst CO_2 "försvunnit" i fas 3 störs jämviktsförhållandet mellan atmosfärens CO_2 -koncentration och vattnets CO_2 -koncentration. För att återställa jämvikten diffunderar koldioxid från atmosfären in i vattnet där det går i fysikalisk lösning. Processerna i faserna 3, 2 och 1 upprepas nu igen och ytterligare kalk går i lösning.

Finns inga andra faktorer inblandade än rent vatten, ren kalcit och luft inställer sig jämvikt när 74 ppm kalcit gått i lösning (vid 10°C). Nu när detta sällan eller aldrig är fallet i naturen, såväl vattnet som kalken innehåller ämnen som påverkar reaktionerna. Som exempel kan nämnas magnesium som mestadels förekommer i kalksten. Små mängder MgCO_3 i lösningen ökar kalcitens löslighet, men överstiger magnesiumhalten 5% av kalciumhalten hämmas kalcitens löslighet (Picknett 1972). Även temperaturen har en viss effekt då ett kallare vatten kan lösa mera koldioxid. Enligt Hutchinson (1957) kan 25% mera kalcit gå i lösning vid 0°C än vid 10°C (detta motverkas, om än i liten grad, av att reaktionen i fas 1 är temperaturberoende). Den allmänt försurade nederbörden bidrar också till en ökad kalkutlösning. Sweeting (1972) anser emellertid att den främsta orsaken till ett vattens ökande förmåga att lösa ut kalk är jordmån och markatmosfär. Birot (1954) nämner att partialtrycket för koldioxid kan vara 100 ggr större i jordatmosfären än i den fria atmosfären. Koldioxiden kommer här ifrån växternas och det mikrobiologiska livets aktivitet.

Står det agerande vattnet i kontakt med jordatmosfären samtidigt som det står i kontakt med kalk kommer kalkutlösning att ske tills ett jämviktsförhållande uppstår mellan jordatmos-

färens CO_2 och vattnets CO_2 . I fig.24 anger tidskolumnen att detta förlopp sker under 1 minut till 60 timmar. Förmodligen är detta tidsförlopp längre då Smith & Mead (1962) och Pitty (1966) anger att tiden för uppnående av ett jämviktstillstånd bör räknas i dagar istället för timmar. Är vattnets cirkulation tillräckligt långsam i kontaktzonen mellan kalk och vegetationstäckt jord får vi alltså en betydligt större utlösning av kalken än tidigare nämnda 74 ppm. Detta är viktigt att ha i åminnelse inför kommande diskussion angående karbonathalten i Lummelundaströmmen.

Avslutningsvis bör nämnas att en porös och sprickrik kalksten gynnar reaktionerna då kontaktytan blir större.

BESTÄMNING AV MÄNGDEN LÖST KALK I LUMMELUNDASTRÖMMEN

Vattnets halt av karbonater och mängden vatten ger tillsammans information om hur mycket kalk som i löst form transporteras bort från dräneringsområdet vid måttillfället. Genom att mäta karbonathalten vid olika vattenföringar, inklusive max- och minimivärden för ett år, kan man om den totala vattenföringen per år är känd, beräkna hur mycket i vattnet kemiskt löst kalksten som transporteras bort per tidsenhet. Därmed kan man också beräkna de årliga kemiska denudationen i dräneringsområdet.

Mätningarna har utförts i oregelbundna intervall på 3 - 14 dagar under tiden maj 1977 - juli 1979 (se bilaga 2). Det första året genomfördes mätningar på tre olika ställen i dräneringsområdet, vid slukhålområde C, vid den nedre dammluckan 1,3 km öster om föregående mätpunkt samt i Lummelundagrottans mynning. Då inga skillnader i erhållna mätvärden kunde konstateras mellan de båda första mätställena i Kanalen, slopades mätpunkten vid dammluckan. Samtliga mätningar har utförts tillsammans med Harriett Jasinski som presenterade delar av resultaten i en seminarieuppsats 1978.

I inledningen till kapitel 5 redogöres för den metodik som använts vid bestämning av vattenföring och vattnets karbonathalt.

För att ge en uppfattning om vattenföringen i Lummelundaströmmen i förhållande till koncentration och transport av karbonationer diskuteras nedan mätningar utförda under fyra olika tidsperioder. Mätningarna är utförda i Kanalen uppströms slukhålen och vid grottmynningen vid extremt låg, medelhög respektive extremt hög vattenföring. Erhållna värden är representativa för dessa vattenföringar enligt alla kompletta mättillfällen (91 st, se bilaga 2) under fältarbetsperioden 1977-79. Data från de fyra mätperioderna har sammanställts i fig.25, vilken hänvisas till i nedanstående diskussion.

Mätperioderna 27.5 - 31.5 och 11.6 - 19.6 uppvisar tämligen likartade värden och kan därför diskuteras tillsammans. Vattenföringen under båda perioderna var mycket låg, endast vid ett tillfälle nådde den över 10 l/s.

Den översta kurvan, i fig.25, visar karbonathårdheten i vattnet. Den är ovanligt hög med ett maximalt värde på 578 ppm (= mg/l). I en sammanställning av Sweeting (1972) redovisas värden från olika länder. Det högsta värdet som anges där är 300 ppm medan Smith (1965) nämner ett extremvärde från norra England på 500 ppm. Helldén (1974) och Hellgren (1969) har båda utfört liknande mätningar i de svenska fjällen, men ingen av dem har uppmätt värden överstigande 75 ppm. Orsaken till de extremt höga värdena i Lummelunda står troligen att finna i det faktum att huvuddelen av dräneringsområdet utgöres av gammal myrbotten där jordarten innehåller stora mängder kalkbleke. Bleken har en kalkhalt på 20 - 50% (Lundqvist et.al. 1940). Vid låg vattenföring kommer allt vatten i Kanalen från i jorden infiltrerad nederbörd. Den uppodlade kärrtorven har säkerligen ett högt partialtryck av CO_2 i markatmosfären. Den finkorniga kalkbleken erbjuder en stor kontaktyta åt vattnet, som under sommarhalvåret p g a låg nederbörd och hög evapotranspiration transporteras långsamt genom jorden. Allt detta tillsammans erbjuder optimala förhållande för kalkutlösningen med extremt hög karbonathalt som följd.

Trots den höga koncentrationen av karbonater vid dessa tillfällen blir den totala mängden borttransporterad kalk liten p g a den ringa vattenföringen. Den andra kurvan nerifrån visar hur låg den transporterade mängden karbonater är och hur den följer vattenföringen. Som mest förs cirka 5 g/s karbonater

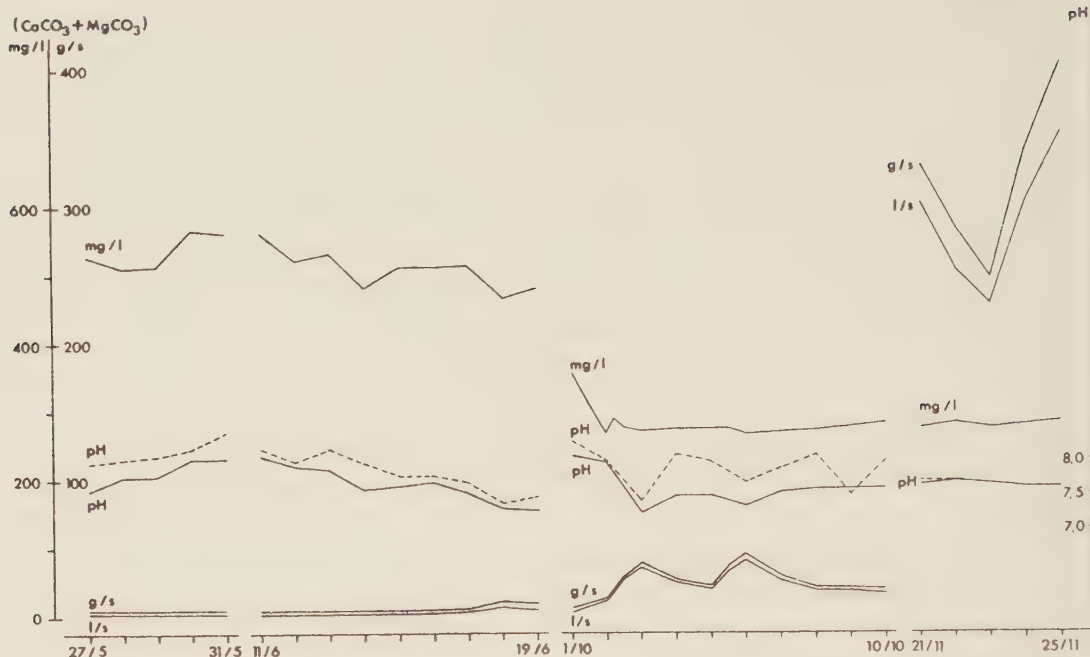


Fig. 25 Analys av vattenströmmen ur Lummelundagrottans mynning under fyra perioder 1977. Kurvorna visar vattenföringen (l/s), totalhårdhet (mg/l), mängden transporterad kalk (g/s) och pH. Streckad kurva anger pH i inloppet.

bort från dräneringsområdet.

Under mätperiod III, 1.10 - 10.10, är vattenflödet från dräneringsbassängen större p g a hög nederbörd. Vid cirka 50 l/s tycks koncentrationen av karbonater stabilisera sig kring 275 ppm. Även när vattenföringen i mätperiod IV överstiger 1 500 l/s är värdet ungefär detsamma. Detta gör att den totala karbonattransporten, vid vattenflöden över 50 l/s är direkt proportionell mot vattenföringen vilket inte alltid är fallet (se Helldén 1974). Orsaken är förmodligen även här de ur kalkutlösningssynpunkt gynnsamma förhållanden som råder i dräneringsområdet.

Mätperiod IV har en mycket hög vattenföring och därmed en stor borttransport av karbonater (se överst till höger i fig. 25). Toppvärden på över 400 g/s ger en klar anvisning om att huvud-

delen av karbonaterna transporteras bort från området under årets sju kallaste månader (se även bilaga 2).

Den streckade kurvan i diagrammet visar pH i inloppet till Lummelundagrottan. Vid de lägre vattenföringarna sjunker pH under passagen genom grottan. Vid den höga vattenföringen är pH detsamma vid ut- och inlopp. Förklaringen är förmodligen att vid låga vattenföringar tar passagen genom det underjordiska systemet åtskilliga dagar och vattnet avkyles till cirka 7°C (de låga vattenföringarna förekommer enbart under sommarmånaderna). Det kallare vattnet förmår lösa mera CO_2 vilket medför en sänkning av pH. Vid den extremt höga vattenföringen tas passagen genom grottsystemet endast några timmar och vattnet har redan från början en låg temperatur (extremhöga vattenföringar förekommer enbart under de kallare delarna av året) varför det inte sker någon nämnvärd avkylning, d v s pH förändras inte. Denna teori styrkes av det faktum att pH sjunker ytterligare några tiondelar efter att ha passerat vattenfallet och forsarna utanför grottans mynning, detta trots att temperaturen stiger. Troligen är det genomluftningen som gör att ytterligare CO_2 går i lösning (under förusättning att jämviktstillstånd ej råder).

I fig.26 har 88 (de 88 första i bilaga 2) mätvärdena på den totala karbonathårdheten avsatts mot vattenföringen. Den empiriskt konstruerade kurvan 1 visar att hårdheten är omvänt beroende av vattenföringen så länge denna understiger 25 l/s. Kurva 2 gäller vid vattenföring överstigande 60 l/s då karbonatkoncentrationen förefaller hålla sig konstant kring 275 mg/l. Detta förhållande är något märkligt, även här borde karbonathårdheten vara omvänt proportionell mot vattenföringen. Kurvorna 1A och 2B i fig.27 visar hur det borde se ut. Orsaken till den mer eller mindre konstanta hårdheten kan vara det speciella förhållande som råder i dräneringsområdet med kärrtorv och bleke. En annan trolig orsak är att de erhållna mätvärdena är för få, eventuellt kan hårdheten variera betydligt mer än vad dessa mättillfällen visar. En kort mätserie på tre dagar i slutet av mars 1978 (bilaga 2) gav värden på 410 - 300 ppm vid en vattenföring i Kanalen på mellan 900 - 3 800 l/s.

Hårdheten sjönk här med den ökande vattenföringen. Då mätningarna företogs när snösmältningen började efter en period med kyla har värdena ej beaktats. Den höga koncentrationen kan härröra från det markvatten som trängdes ut av smältvattnet enligt en hypotes av Nilsson (1972). Han noterade en ökning av salthalten i Ammerån omedelbart före vårfloden.

Den streckade kurvan i fig.26 illustrerar funktionen $y = ax^b$ där y = karbonathårdheten, x = vattenföringen, konstanten $a = 672,8$ och $b = -0,15$. Trots att kurvan ser ut att stämma dåligt är korrelationskoefficienten $r = 0,87$ (beräknat på samtliga 88 värden).

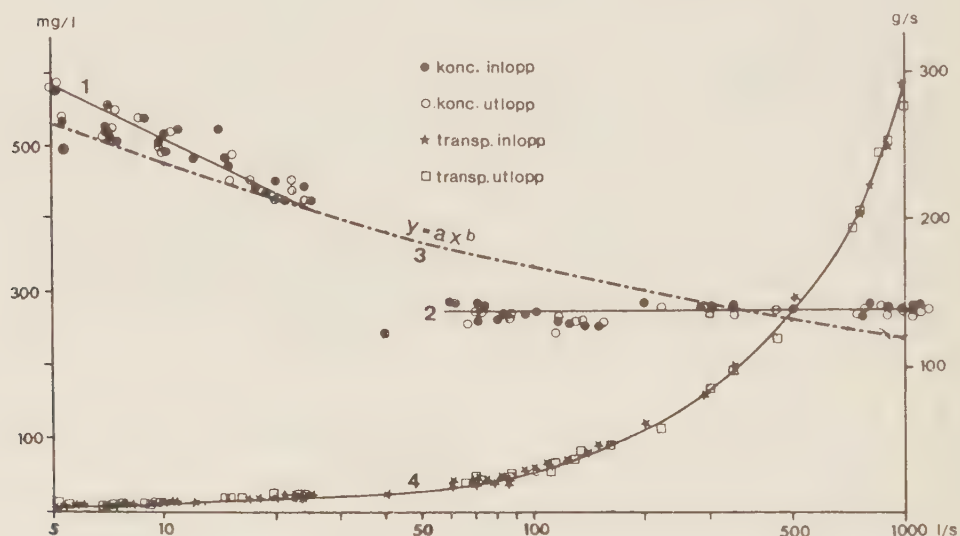


Fig.26 Kurvorna 1, 2 och 3 illustrerar förhållandet mellan karbonathårdhet (mg CaCO_3/l) och vattenföring. Kurvorna 1 och 2 är empiriskt konstruerade medan kurva 3 beskriver funktionen $y = ax^b$ där y = karbonathårdheten, x = vattenföringen, $a = 672,8$ och $b = 0,15$. Kurva 4 illustrerar förhållandet mellan transport och vattenföring.

Helldén (1974) fann att karbonatkoncentrationen var beroende av temperaturen. Detta illustreras i fig.27 där kurvorna 1A och 2A uppvisar olika värden på hårdheten vid samma vattenföring men i skilda temperaturintervall. Det lägsta temperaturintervallet ger högsta värdet på y . I Lummelunda är det snarare tvärtom, de höga värdena erhöles på sommaren med temperaturer på $10 - 20^\circ\text{C}$ i inloppet (som tidigare nämnts är det dock här

inte temperaturen som orsakar de höga värdena på karbonathår-
heten).

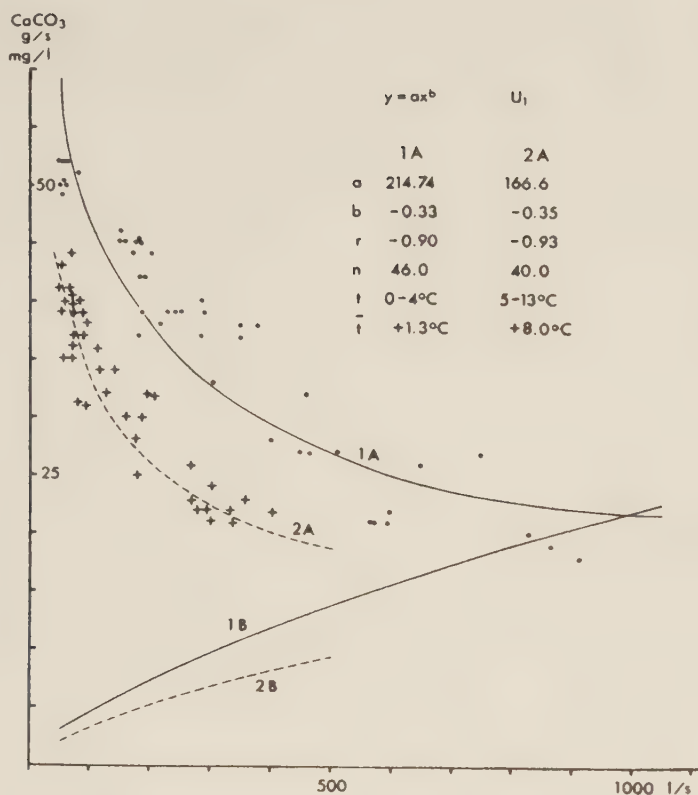


Fig. 27 1A och 2A illustrerar förhållandet mellan karbonathår-
het och vattenföring (vid två olika temperaturintervall)
i den största karstkällan i Sotsbäckens karstområde
(efter Helldén 1974).

Kurva nr 4 i fig. 26 visar den totala karbonattransporten i
g/s. Av kurvan framgår det tydligt att det är vid de höga
vattenföringarna som större delen av transporten sker.

Som tidigare nämnts är karbonathårheten i Lummelundaströmmen
mycket hög, från 245 ppm till 578 ppm. En beräkning har gjorts
för att utröna i vilken mån vattnet är mättat eller omättat
på karbonater. 1952 konstruerade Trombe ett relationsdiagram
mellan pH och koncentrationen av CaCO_3 . Detta diagram revi-
derades senare av Jacobsson & Langmuir (1972). Fig. 28 visar
dessa båda kurvor. I diagrammet har 88 mätvärdet plottats in.

Befinner sig det inplottade värdet över kurvan är vattnet övermättat på karbonater, och under kurvan är det omättat d v s det är då aggressivt och kan lösa mera kalk.

Enligt Trombes kurva är vattnet aggressivt vid tio av mättillfällena medan det enligt Jacobsson & Langmuir's kurva är övermättat vid samtliga tillfällen. Då J & L's kurva är en revision av Trombes blir slutsatsen att vattnet vid samtliga mättillfällen var övermättat.

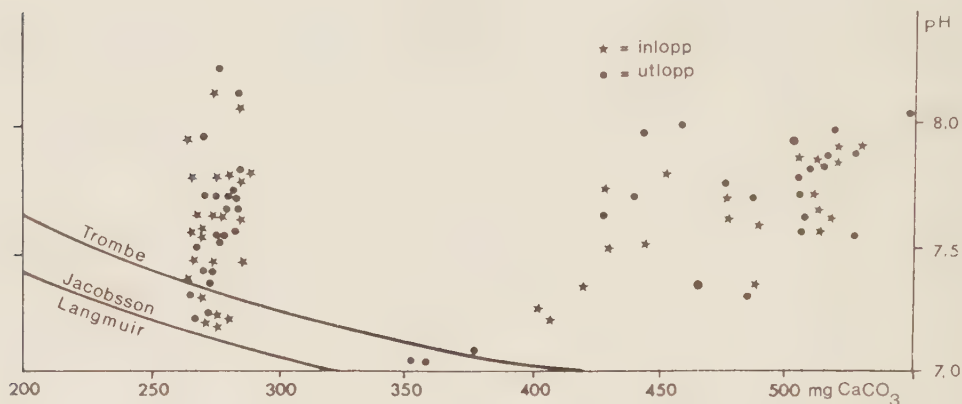


Fig. 28 Kurvorna visar två förslag på när rent vatten vid 10⁰ blir mättat med kalk vid olika pH. Kurvorna har upprättats av Trombe (1952) och Jacobsson & Langmuir (1972). 88 värden från Lummelundaströmmen har plottats in i diagrammet. Enligt den nedre kurvan är alla prov mättade och enligt den övre är 78 prov mättade medan 10 är aggressiva.

Nu bör det tilläggas att deras tester utfördes med laboratorielösningar vari inga okända faktorer fanns. Det kan emellertid finnas andra faktorer i vattnet som ökar kalklösligheten trots högt pH. Så har t ex Gemit & Marlak (1976) påvisat att förekomsten av SO₄ i vattnet ökar karbonathårdenheten.

Avslutningsvis bör nämnas att såväl Trombe som Jacobsson & Langmuirs kurva gäller vid en temperatur av 10⁰C, medan de av mig inplottade värdena härrör från temperaturer mellan 1 - 23⁰C. Egentligen borde de värden som härstammar från en temperatur överstigande 10⁰C förflyttas något åt vänster i fig. 28 (enl. fas 1 i Böglis lösningsschema), men då det enbart är de höga

koncentrationerna, som härstammar från vatten med hög temperatur, förändras inte resultatet.

De prov som tagits vid temperaturer under 10°C bör justeras åt höger i figuren vilket enbart ökar graden av övermättnad. Dessutom är skillnaden i koncentrationen liten, det rör sig om cirka 3 ppm vid 10°C differens.

Vid jämförelse med de mätningar som företagits i fjällen, visar det sig att förhållandena där är de motsatta. Samtliga prover som tagits av Helldén (1974) och Jasinski (1978) var aggressiva. Fig.29 visar Helldéns högsta och lägsta värden för tre olika provtagningsställen i Sotsbäckens karstområde.

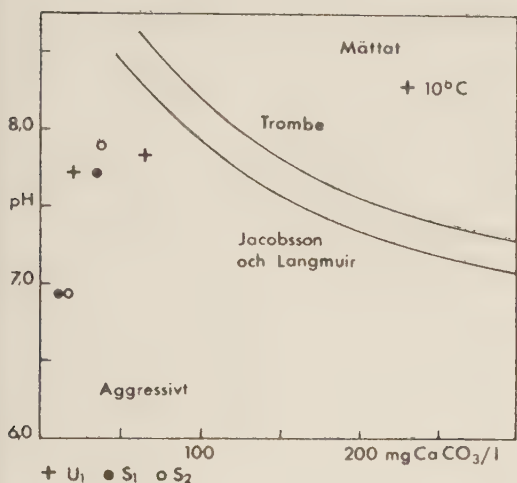


Fig.29 Samma kurvor som i fig. 28 men med inplottade högsta och lägsta värden på totalhården i källor och sluk i Sotsbäckens karstområde. Samtliga värden är aggressiva (efter Helldén 1974).

Karbonatövermättnaden i Lummelundaströmmen är inte unik på Gotland. Prover tagna i flera sjöar och vattendrag i kalkstensområden, var i de flesta fall övermättade. Som exempel kan nämnas Gothemsån med 409 ppm - pH 7,5 och Tingstäde Träsk 178 ppm - pH 8,1.

KORROSIONSINTENSITETEN BERÄKNAD PÅ HYDROKEMISKA ANALYSER

Korrosionsintensiteten eller den kemiska denudationen i ett område anges i mm/1 000 år eller m^3/km^2 år. Måttet anger den teoretiska sänkningen av landytan jämnt fördelat över denna. Denudationen kan beräknas om följande fakta är kända: dräneringsområdets yta, den effektiva avrinningen per år och dess fördelning i tiden samt vattnets halt av karbonater vid olika vattenföringar.

För att få kunskaper om det senare måste man mäta karbonathalten under minst en årscykel vid olika representativa vattenföringar inklusive årets maxima- och minimivärden. Detta är nödvändigt då karbonatkoncentrationen, som tidigare diskuterats, varierar med vattenflödet. Tyvärr är flera av de beräkningar av korrosionsintensitet som baserar sig på Corbels formel (Corbel 1959) inte tillförlitliga då de är baserade på ett fåtal mätningar utan hänsyn till att karbonathalten kan variera med vattenföringen. Detta har påpekats av Helldén (1974) och Bakalowicz (1975) som båda säger att det är viktigt med många och representativa prov för att erhålla information om totalhårdhetens variationer.

För att erhålla ett så korrekt värde som möjligt på denudationen bör man beräkna kalktransporten för de olika vattenföringsperioderna under året. Summan av värdena från dessa perioder ger den totala transporten under året. Undersökningen har visat att Lummelundaströmmens vattenföring kan delas upp i två klart särskilda perioder. Pegeldiagram upprättade av Lantbruksnämnden under åren 1958-60 (fig.15) visar samma sak. Under månaderna maj t o m september ligger vattenföringen kring 10 l/s (kan dock vara betydligt mer i maj) och under resterande sju månader över 50 l/s. Då totalhårdheten i vattnet är i det närmaste konstant vid vattenföringar överstigande 50 l/s, kan dessa sju månader behandlas som en period.

Den kemiska denudationen för området (hela dräneringsområdet) har beräknats efter en formel från Corbel (1959) och som modifierats av Williams (1963) och slutligen av Helldén (1974)

$$X = \frac{Tr_{C+m} \cdot t}{D \cdot A \cdot 10^6}$$

X = denudationen i mm/år eller km^3/km^2

Tr_{C+m} = totala transporten av i vattnet lösta karbonater, uttryckt i g CaCO_3/s

t = tiden i sekunder

D = kalkstenens täthet = $2,6 \text{ g/cm}^3$

A = kalkstensområdet yta = 68 km^2

Den effektiva avrinningen för området är $258,7 \text{ l/s}$ (beräknat i kapitel Hydrologi). Enligt tidigare resonemang är avrinningen uppdelad i två perioder där vi under fem månader har en avrinning på 10 l/s . Den resterande avrinningen blir då $436,3 \text{ l/s}$ fördelad på sju månader. Även om denna sistnämnda månadsfördelning ej är inbördes korrekt har det inte någon betydelse då huvudsaken är att vattenföringen överstiger 50 l/s . Sättes dessa båda värden in i diagrammet fig.26, erhålles följande resultat:

transporten under maj t o m september = $5,1 \text{ g CaCO}_3/\text{s}$.

transporten under övriga sju månader = $120 \text{ g CaCO}_3/\text{s}$.

Denudationen beräknas därefter med hjälp av dessa båda transportvärden samt värdena från de små källorna i området.

Resultatet redovisas i tabell 4.

Tabell 4 CaCO_3 transport från Lummelundaströmmens dräneringsområde

Period	Vattenföring l/s	Transport m^3/km^2	Total trp. m^3	% av årstrp
Maj - sept	10	0,37	25,16	2,8
Okt - apr	436	12,3	836,4	93,9
Hela året *)	6	0,43	29,1	3,3
Hela året	265	13,1	890,67	100

*) avser vattenföring och transport i källorna 1, 3 och 4.

Som jämförelse presenteras i tabell 5 motsvarande värden från Sotsbäckens karstområde i Sv.Lappland efter Helldén (1974).

Tabell 5 CaCo transport från Sotsbäckens karstområde (efter Helldén 1974)

Period	Vattenföring l/s	Transport m^3/km^2	Total trp. m^3	% av årstip.
Maj	225	6,6	7,2	23,7
Juni	425	9,2	10,0	32,9
Juli	155	2,9	3,2	10,5
Augusti	75	1,8	2,0	6,6
Sept-apr	25	7,3	8,0	26,3
Hela året	105	27,9	30,4	100,0

Av tabell 4 framgår tydligt att borttransporten av kalk huvudsakligen sker under de sju kallaste månaderna då inte mindre än 94% av årets totala kalktransport äger rum. I Sotsbäckens karstområde är förhållandet det motsatta, där sker mindre än 25% av årets transport under motsvarande månader. Orsaken till dessa skillnader är förmodligen de milda vintrarna och den höga evapotranspirationen sommartid på Gotland kontra kalla vintrar, låg sommarevapotranspiration och sen snösmältning i fjällområdet.

Den totala transporten per km^2 och år, d v s denudationen ($\text{mm}/1\ 000\ \text{år}$), är 2,2 ggr högre i fjällområdet än i Lummelunda, detta trots att koncentrationen i vattnet endast ligger mellan 15 och 57 $\text{mg CaCO}_3/\text{l}$. I Lummelunda är motsvarande siffror 245 - 578 mg/l , koncentrationen är alltså mer än 10 ggr så hög. Den främsta orsaken till Sotsbäcksområdets högre värde på denudationen (27,9 $\text{mm}/1\ 000\ \text{år}$ mot 13,1 $\text{mm}/1\ 000\ \text{år}$) är att nederbörden där är dubbelt så hög och evapotranspirationen betydligt mindre vilket medför en hög effektiv avrinning, cirka 7 ggr högre än i Lummelunda.

I tabell 4 har även vattnet från samtliga källor tagits med, detta förfaringssätt kan dock diskuteras. De 6 l/s som anges som årsmedelvärde avser endast det vatten som ej härstammar från slukhål i Kanalen, men det rör sig ändå om ett vatten som har infiltrerats i dräneringsområdet och bör därmed räknas in i den effektiva avrinningen. Värdena har tagits med och adderats till de övriga av följande skäl:

1. det enligt Tamms formel beräknade värdet på evapotranspirationen är eventuellt något för högt. Ångström (1974) anger evapotranspirationen för Visby till 422 mm, detta lägre värde har han också fått via Tamms formel men tyvärr framgår det inte varför det är lägre. Om Ångströms värde är mera korrekt kompenseras detta i så fall i viss mån genom tillägget av 6 l/s.
2. totalhårdheten i de små källorna varierar inte som i Lummelundaströmmen utan håller en koncentration på 350 - 400 ppm (utom vid högvatten då vatten via slukhål påverkar källorna 3 och 4). Fenomenet att exsurgence källor har små variationer i koncentrationen under en årscykel och resurgence-källor stora, har undersökts av Shuster & White (1971). De anger att totalhårdheten i exsurgence varierar med mindre än 5%. I Lummelunda är variationen cirka 15% utom vid högvatten då den är större.

Arligen transporteras det enligt beräkningarna bort över 890 m³ kalk i löst form från Lummelundaströmmens dräneringsområde vilket motsvarar en teoretisk landsänkning på 13,1 mm/1 000 år. Nu är denna teoretiska landsänkning givetvis inte reell då den ej sker jämnt över hela landytan på 68 km².

Atkinson & Smith (1976) har vid en undersökning i Mendip Hills i Storbritannien konstaterat att 67% av korrosionen sker i ytan (i jorden och på ytan av berggrunden), 31,4% i berggrunden och bara 0,05% som utvidgning av grottssystem. Helldén (1974) däremot hävdar att 33% av den totala korrosionen i Sotsbäckens karstområde sker i grottssystemet.

Liknande siffror för Lummelunda är här olämpliga att lägga fram då mätserierna är för korta. Mätperiodernas längd är nämligen av stor betydelse när vattenpassagen genom grottan kan ta över tre dygn.

Jämförelser av kalktransporten i in- respektive utlopp (periodvis enligt bilaga 2) visar märkliga resultat. I grottan tycks det ibland ske en utfällning av kalk och vid andra tillfällen en utlösning. Huruvida detta är ett reellt eller skenbart fenomen kan inte diskuteras p g a de korta mätserierna.

I samband med genomförda beräkningar bör nämnas en undersökning utförd av Kempe (1975). Han har funnit att Ca och Mg-jonerna kan bilda organiska komplex i vattnet. Dessa organiskt uppbyggda joner kan ej påvisas vid de vanliga hydrokemiska analyserna. Kempe fann vid komplexometrisk titrering med EDTA att den totala karbonathårdheten visade 5% lägre värde än vid en analys utförd med atomabsorption. Då det ännu inte kan anses klarlagt om detta är generellt tillämpligt beaktar jag det ej i mina beräkningar, men om det nu har allmän giltighet bör de här framräknade värdena på denudationen anses som minimivärden.

MORFOMETRISKA ANALYSER

Morfometriska analyser är långt ifrån något nytt i den geografiska forskningen. Men trots att metodiken varit känd under hela 1900-talet är det sällan den utnyttjas.

I morfometrin förenar man geomorfologin med matematiken. Resultatet blir en objektiv artimetisk beskrivning av landformerna vilket möjliggör en exakt jämförelse mellan undersökningar utförda med samma metodik. Trots dessa uppenbara fördelar har relativt få geografer arbetat med eller försökt vidareutveckla morfometrin. Den amerikanske geomorfologen Russel (1949) uppmärksammade sin kollegor att i görligaste mån använda sig av kvantitativa metoder. Han menade också att morfometrin måste utvecklas kraftigt om geomorfologin skulle erhålla samma vetenskapliga standard som övrig naturvetenskaplig forskning. I ovanstående synpunkter instämmer Behrens (1953) som själv presenterat det hittills främsta morfometriska arbetet i landet. Sedan dess har i Sverige ytterligare en avhandling med framträdande morfometriska inslag presenterats av Abrahamsson (1974). Abrahamsson framför dessutom en del kritik mot den morfometriska analysen, kritiken gäller dock främst morfometriska kartor.

Karstmorfometrin introducerades redan 1893 av Cvijić, men tycks sedan ha fallit i glömska fram till i slutet av 1960-talet då La Valle (1968) återupptog metodiken. Sedan dess har karstmorfometrin, fram t o m 1978, behandlats av ytterligare 17 författare. De främsta arbetena är Gorbunova 1968, Williams 1969, 1971, 1972, Helldén 1974, Pringle 1973, Day 1976, Ogden & Reger 1977 och Mezösi, Bárány & Tóth 1978.

Av de nämnda författarna är det dock bara Helldén och Williams som har gjort uttömmande analyser, av samtliga i karstlandskapet förekommande formelement, vilket är nödvändigt för framtida jämförelser. Smith & Atkinson (1976, sid.402) säger i samband med karst: "In future, geomorphologists should be able to use the morphometric measures developed by Williams, and perhaps others which may be suggested in the future, to make very fine distinctions between different landscape types. Then and only then, will it be possible to frame precise questions about the influence of climate upon landscape and the inter-relation of landforms and erosion processes, erosion rates and hydrology. Until that time, we must content ourselves with a few hypotheses which may be properly tested when sufficient morphometric data have been collected from different parts of the world".

Den här utförda morfometriska analysen bygger på den metodik, som introducerades av Williams (1969, 1971, 1972a, 1972b) och som sedan vidareutvecklats av Helldén (1974). Vissa förenklingar av symboler har dock utförts och ett tillägg av volymbereäkningar enligt en egen metod har gjorts i tabell 8. Metodiken omfattar analys av de hydrologiska parametrarna samt analys av förekommande depressioner. Till dessa två variabler vill jag lägga ytterligare sex, nämligen klimat, areal, berggrund, jordtäck, höjdförhållanden och erosionsnivåer. Samtliga är viktiga faktorer som bör beaktas då olika karstlandskap jämföres med varandra.

De sex nya variablerna redovisas i tabellform då materialet på så vis blir mera överskådligt och lättare att jämföra med eventuella framtida framställningar. Alla ingående variabler kan ges ett aritmetiskt värde vilket skulle ge "rena" tabeller. Detta har jag emellertid inte gjort då den redan komplicerade tabellen i så fall skulle bli ännu mera svårläst.

Den initierade konstaterar att jag i nedanstående sammanställning utelämnat en faktor som är av stor betydelse vid karstifiering, nämligen vegetationen. Anledningen är dels att den nuvarande vegetationen, på grund av människans inverkan, i stora delar av världen inte återspeglar den situation som rått under större delen av landskapets utveckling, dels för att klimatindelningen i grova drag anger den naturliga vegetations-typen. Den här föreslagna analysen lämpar sig bäst för mindre karstområden eller för delar av större landskap. Om allt för stora områden analyseras blir informationen av en del variabler alltför generell,

YTUTBREDNING:

1. Dräneringsbassängens yta i km^2 .
2. Den yta av dräneringsområdet som utgöres av förkarstningsbar berggrund, km^2 .
3. Ytan på det av terrängförhållande (t ex vattendelare) avgränsade karstifierat område som nedanstående analyser utförts på, km^2 .

HÖJDFÖRHÅLLANDEN:

1. Höjden över havet i m. Den medelhöjd större delen av karstområdet befinner sig på.
2. Den högsta och lägsta altituden i landskapet.
3. Landskapets medellutning i % i dräneringsriktningarna.

KLIMAT:

1. Indelning efter Köppens (1936) tregradiga klassifikations-system.
2. Årsmedeltemperaturen för området, $^{\circ}\text{C}$.
3. Medelnederbörden/år, mm/år.

EROSIONSBASER:

1. Antalet kända generationer i grottor, d v s de olika generationsnivåer som kan urskiljas i enskilda grottsystem. Första siffergruppen anger totala antalet nivåer och andra anger antalet grottor.
2. Antalet kända erosionsbaser i regionen, t ex strandhak.
3. Antalet generationsnivåer i grottor som kan korreleras med erosionsbaser i regionen.

JORDTÄCKE:

1. Jordarter bildade in situ genom vittring. Första siffergruppen anger jordtäckt yta i % av hela karstlandskapet, andra gruppen anger jordtäckets genomsnittliga mäktighet i m.
2. Övriga minerogena jordarter. Första siffergruppen anger jordtäckt yta i % av hela karstlandskapet, andra gruppen anger jordtäckets genomsnittliga mäktighet i m.
3. Första siffergruppen anger organogena jordarter och deras täckning i % av hela karstområdet. Den andra gruppen betecknas med 1 om bevis finns för att större delen av karstlandskapet tidigare varit täckt av mineraljord, med 2 om misstankar finns att det varit täckt av mineraljord, med 3 om bevis finns att det till större delen varit täckt av organogen jord och med 4 för misstankar om organogen jord.

BERGGRUND:

1. Bergart, där följande bergarter kan anges; Kalksten = mer än 95% kalcit, rest = dolomit. Magnesiumkalksten = 90 - 95% kalcit, rest = dolomit. Dolomitisk kalksten = 50 - 90% kalcit, rest = dolomit. Kalcitdolomit = 10 - 50% kalcit, rest = dolomit, Dolomit = mindre än 10% kalcit, rest = dolomit. Gips och salt
2. Den karstifierbara bergartens mäktighet i m.
3. Bergartens struktur där följande kan anges: veckad, veckad metamorf och ostörd lagrad bergart.

Tabell 6 Ytutbredning, höjdförhållanden, klimat, erosionsbaser, jordtäckte och berggrund för karstområdet vid Lummelunds bruk

	1	2	3
Ytutbredning	68 km ²	68 km ²	0,9 km ²
Höjdförhållanden	43 m	45/12	1
Klimat	Cfb	7,1 ⁰ C	554 mm/år
Erosionsbaser	2/1	4	1
Jordtäckte	6/0,2	94/1,0	-/-
Berggrund	Kalksten?	500 m ^{a)}	ostörd lagrad

a) Munthe 1925

DRÄNERINGSSYSTEM:

Dräneringssystemets olika parametrar, vattendrag-sluk-källor, utgör en enhetlig grupp, som är lämplig att sammanställa i en analys. Symbolerna härrör från den engelska terminologin efter Williams (se Helldén 1974).

A = undersökta kalkstensområdets yta i km².

S = sluk

Hs = slukens genomsnittliga höjd över havet i m.

Kr = karstkälla

Hr = karstkällornas genomsnittliga höjd över havet i m.

ΣL = sammanlagda längden av samtliga vattendrag på kalksten

Σ = summa

$Ds = \frac{\Sigma S}{A}$ = sluktäthet, antal sluk per ytenhet.

$Dr = \frac{\Sigma Kr}{A}$ = källtäthet, antal källor per ytenhet

$Rsr = \frac{\Sigma S}{\Sigma Kr}$ = sluk/källkvoten, ger en indikation på det underjordiska dräneringssystemets utbredning och förgrening.

Lu = det genomsnittliga horisontella avståndet mellan varje sluk och dess källa. Parametern ger en indikation på det underjordiska dräneringssystemets utbredning.

Vhr = $\frac{\text{standardavvikelsen Hr} \times 100}{\text{Hr}}$ = källkoefficienten, ett mått på karstkällornas variationer i höjd. Parametern kan i vissa fall tolkas som ett mått på grundvattenytans konformitet och därmed ge en uppfattning om det subterrana dräneringssystemets utvecklings och utbredningsmönster.

Dl = $\frac{\Sigma L}{A}$ = yt-dräneringstätheten, ett mått på yt-dräneringssystemets längd per ytenhet kalksten och därmed ett indirekt mått på karstområdets permeabilitet.

Tabell 7 Morfometriska analyser av det totala antalet kända permanenta, intermittenta och fossila sluk, källor och vattendrag i Lumme- lunds karstområdet. Standardavvikelse ().

	Permanent	Intermittent	Fossila	Totalt
S.....	-	33	2	35
Kr.....	4	2	-	6
Hr.....	15 (4,6)	18 (2,8)	-	16 (4,2)
Ds/km ²	-	36,7	2,2	38,9
Dr/km ²	4,4	2,2	-	6,6
Rsr.....	-	-	-	5,8
Lu i km.....	-	0,7	0,3	0,7
Vhr.....	30,7	15,6	-	26,3
Dl km/km ²	-	1,3	-	1,3

Kommentar till tabell 7:

Antalet intermittenta sluk är förmodligen något högre då tidigare dokumenterade sluk täppts igen och inte återfunnits. (se kap.5). Angivet antal för S är alltså ett lägsta värde.

De värden som anges per km^2 har beräknats efter det undersökta området från källorna nedanför klinten till sluken vid C. Det avgränsade området har en yta av $0,9 \text{ km}^2$ (markerat med punktlinje i fig.3). I öster och väster utgöres gränsen av Högklintkalkens utbredning i markytan. I norr och söder har avgränsningen konstruerats med avseende på uppskattad dräneringsriktning efter avvägningar med instrument i terrängen.

Av källorna (Kr) har fyra angivits som permanenta då bevis om annat förhållande saknas.

Helldén (1974) konstaterade att Artfjällets karstområde har en hög permeabilitet och ett välutvecklat underjordiskt dränerings-system. Vid en jämförelse med Lummelundas karstområde framkommer följande (Helldéns värden inom parentes): Sluktätheten $D_s = 38,9 (8,2)/\text{km}^2$, källtätheten $D_r = 6,6 (6,1)/\text{km}^2$ och yt-dräneringstätheten $D_l = 1,3 (1,1)/\text{km}^2$. Lummelundas karstområde bör alltså ha en högre permeabilitet än Artfjällets och ett lika välutvecklat subterrant dräneringssystem.

När värdet på sluk/källkvoten, R_{sr} , överstiger 1 kan detta enligt Helldén tolkas som att det underjordiska dränerings-systemet är av vadös karaktär och saknar en homogen grundvattenyta. Värdet $R_{sr} = 5,8$ (Artfjället 1,5) visar att det underjordiska dräneringssystemet är utbildat som ett normalt yt-dräneringsnät, d v s många tillflöden till "huvudströmfåran".

Tre av de permanenta källorna står under hydrostatiskt tryck och är troligen att anse som "läckage" från grundvattenakvifären vilket bör betyda att grundvattenytan vid varje källa ligger över denna nivå.

KARSTDEPRESSIONER:

En morfometrisk analys av karstsänkorna ger en god bild av hur karstifierat området är. I denna sammanställning borde även slukhålerna ingå, men då såväl ytan som volymen av dessa är ringa har de enbart beaktats vid en beräkning av depressions-tätheten. Tabell 8 omfattar alltså enbart dolinerna i området, fig.30 visar hur dessa har mätts upp.

A1 = det område som är beläget i nordvästra delen av fig.3 och som begränsas av Lummelundaströmmens torrfåra, klinten, Ancyclusvallen och den lilla vägen i sydväst. $0,036 \text{ km}^2$.

A2 = dolinområdet söder om A1. Avgränsat av klinten, lilla vägen i norr och landsvägen. 0,013 km².

A = hela det undersökta kalkstensområdet yta. 0,90 km .

n = antalet observationer

Acd = dolinernas genomsnittliga yta

Lcd = dolinernas genomsnittliga längd

Wcd = dolinernas genomsnittliga bredd

Vcd = dolinernas genomsnittliga volym

Hcd = dolinernas genomsnittliga relief = skillnaden mellan lägsta punkten och medelhöjden till kanten av dolinen (Helldéns beräkningar är efter högsta och lägsta punkt)

Rcd = längd/bredd förhållandet i genomsnitt

Dcd = depressionstätheten, antalet doliner per ytenhet

Rp = perforeringsindex, dolinernas sammanlagda yta genom det undersökta områdets yta

Rd = denudationsindex, dolinernas beräknade sammanlagda bort-eroderade volym per ytenhet.

Tabell 8 Morfometrisk analys av doliner i Lummelunds karstområde. Värden inom parantes anger standardavvikelsen.

	A1	A2	A1 + A2	A
n	42	8	50	53
Lcd m	8,7 (4,7)	16,1 (6,0)	9,9 (5,6)	10,0 (5,6)
Wcd m	5,7 (3,0)	10,0 (3,0)	6,4 (3,4)	6,5 (3,1)
Acd m ² ...	50,1 (51,3)	129 (85,7)	62,7 (64,1)	62,0 (61,8)
Vcd m ³ ...	15,3 (19,0)	37,1 (22,5)	18,8 (20,0)	18,6 (20,6)
Hcd m	0,75 (0,41)	0,78 (0,22)	0,75 (0,36)	0,75 (0,36)
Rcd	1,5	1,6	1,5	1,5
Dcd/km ² ..	1166,7	615,3	1010,1	58,9
Rp	1/17,1	1/12,6	1/15,6	1/274,5
Rd m ³ /km ² .	17863	22846	19185	1078

Kommentar till tabell 8:

Vid beräkning av dolinernas volym, V_{cd} , har dolinerna förutsetts ha en konisk form. Då de flesta doliner har en mera skål-liknande form är beräknade värden att anse som minimivärden. Den mest väsentliga informationen finns i de två högra kolumnerna. Det är dessa siffror som bör användas vid jämförelser med andra karstområden. $A_1 + A_2$ avser hela det område, som saknar egentligt jordtäckte och har en berggrund av revkalk, d v s det område inom vilket dolinerna uppträder. A avser hela det undersökta områdets yta. I tabellen saknas uppgifter för hela dräneringsområdet (68 km^2) vilket beror på att området är för stort för en så detaljerad undersökning. I dräneringsområdets södra del, vid Ormkeldur, finns ytterligare karstformer.

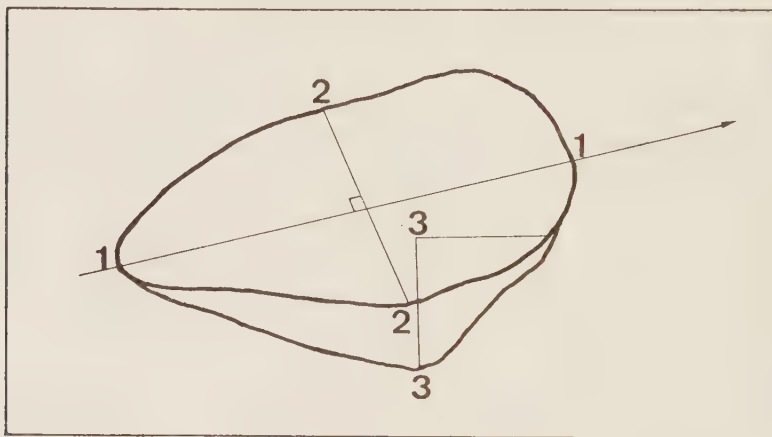


Fig. 30 Principskiss av dolin i Lummelunda. Linjerna 1 - 3 visar hur längd, bredd och djup har mätts upp.

Ser man till depressionstätheten (D_{cd}) för $A_1 + A_2$ så är detta område starkt karstifierat. Helldén (1974) anger att Artfjället är i hög grad karstifierat med en depressionstäthet på $57,0/\text{km}^2$. Detta är samma värde som för område A i Lummelunda, $58,9/\text{km}^2$, men då är enbart dolinerna medräknade. Räknas även sluken in, som Helldén har gjort, fås istället $97,8/\text{km}^2$.

Den genomsnittliga depressionsytan (A_{cd}) i Lummelunda är $62,3 \text{ m}^2$ och på Artfjället $58,8 \text{ m}^2$, en förvånande likhet som

dock inte behöver betyda något. Tyvärr saknas värden på standardavvikelsen från Artfjället, men personlig kännedom om området säger att denna bör vara högre än standardavvikelsen i Lummelunda.

Perforeringsindexet $R_p = 1/275$ ligger också förvånansvärt nära Artfjällets karstområde, som har $R_p = 1/297$. Men ser man i Lummelunda enbart till det område (A_1+A_2) där dolinerna förekommer är värdet på R_p betydligt högre. Reliefen (Hed) i Lummelunda är emellertid betydligt lägre än i Artfjället där Hed = 2,4 för samtliga depressioner och 1,8 för doliner av samma typ som i Lummelunda. Lösningssdolinernas längd/breddförhållande (Red) är i Artfjället 1,4 och på Gotland 1,5 alltså tämligen likartade förhållanden. Tyvärr har Helldén inte genomfört några volymeräkningar av karstdepressionerna i Artfjället. Den enda jämförbara analys av detta slag utfördes 1968 av Gorbunova i Ural. Hon undersökte ett 140 km^2 stort område med karbonatberggrund med avseende på dolinernas yta och volym. Dolinerna upptog en yta av totalt $0,1 \text{ km}^2$ vilket ger ett perforeringsindex på $1/1400$ alltså betydligt lägre än för Lummelunda och Artfjället. Den totala volymen anges till $0,001 \text{ km}^3$ vilket ger ett denudationsindex av $7,1 \text{ km}^3/\text{km}^2$, ett värde som ligger betydligt under värdena från Lummelundas karstområde.

Sammanfattningsvis kan sägas att Lummelundas karstområde är karstifierat i en hög grad och att de ytmorfologiska effekterna av karstifieringen enbart uppträder där jordtäcke saknas. Vid en jämförelse med Artfjällets karstområde ligger värdet för flera av parametrarna mycket nära varandra, det är i princip enbart depressionstätheten och dolinernas genomsnittliga relief som skiljer sig från varandra, det sista på så vis att dolinerna i Lummelunda är flackare.

Trots den höga förkarstningsintensiteten är dolinerna små jämfört med doliner på sydligare latituder, ett faktum som stöder teorin att Lummelundadolinerna är unga, d v s postglaciala bildningar.

Några sprickor i egentlig mening har ej konstaterats i revkalkstenen varför en korrelation med dolinernas längdriktning ej kunnat utföras. Rosdiagrammet, fig 11, visar emellertid att dolinerna ej är slumpvis orienterade utan i stort följer tre huvudriktningar.

DENUDATIONSBERÄKNINGAR - JÄMFÖRELSE MELLAN TVÅ OLIKA METODER

I karstsammanhang har hittills hydrokemiska analyser använts för att beräkna korrosionsintensiteten d_v s den kemiska denudationen. För Lummelunda har borttransporten av kalk från området beräknats till $890 \text{ m}^3/\text{år}$ vilket motsvarar en landsänkning på $13,1 \text{ mm}/1\ 000 \text{ år}$.

I den här genomförda morfometriska analysen beräknades dolinernas sammanlagda borteroderade volym, för området A1 + A2, till $19\ 185 \text{ m}^3/\text{km}$. Enligt tidigare resonemang är dolinerna post-glaciala. Detta ger en tillväxttid på $12\ 000 \text{ år}$ vilket är den tid som förflutit sedan isen försvann från denna del av Gotland (Lundqvist 1961). Denudationen för dolinerna, beräknat på denna tillväxttid, blir därmed $1,6 \text{ mm}/1\ 000 \text{ år}$. Korrosionen sker nu inte enbart i dolinerna, den är bara som mest intensiv där, varför $1,6 \text{ mm}/1\ 000 \text{ år}$ är ett minimivärde. Förutsätter man att korrosionen är lika intensiv i kalkstenen som omger dolinerna, och negligerar den inbördes landsänkande effekten, fås ett maximivärde på $24,9 \text{ mm}/1\ 000 \text{ år}$ ($1,6 \times$ inverterade värdet på perforeringsindex R_p).

Den morfometriska analysen ger alltså ett värde för den kemiska denudationen på mellan $1,6 \text{ mm}/1\ 000 \text{ år}$ och $24,9 \text{ mm}/1\ 000 \text{ år}$. Minimivärdet är utan tvekan för lågt då korrosion även äger rum vid sidan om dolinerna, maximivärdet är troligtvis för stort då dolinerna bildas där vattnet ansamlas och lättast tränger ner i berggrunden. Det korrekta värdet bör alltså ligga över respektive under ovanstående minimi - maximivärden.

Det hydrokemiskt beräknade värdet indikerar att den kemiska denudationen i hela dräneringsområdet ligger kring $13 \text{ mm}/1\ 000 \text{ år}$. Den morfometriska beräkningen indikerar att värdet på denudationen i den del av området, som utgöres av revkalk, ligger mellan 2 och $25 \text{ mm}/1\ 000 \text{ år}$.

Resultaten motsäger inte varandra utan visar på en kemisk denudation av ungefär samma storleksordning. Jämförelsen kan emellertid diskuteras då området med revkalk utgör en ringa del av hela dräneringsbassängen. Metoden kan dock vara värd att testa i ytterligare karstområden.

LANDSKAPETS FRAMTIDA UTVECKLING

I de delar av dräneringsområdet som saknar mäktigare jordtäckelse, d v s närmast klinten, kommer dolinerna att successivt vidgas och fördjupas. Under förutsättning att ingen klimatförsämring inträffar, med en ny istid som påföljd, kommer dolinerna efter hand att bli större och eventuellt växa samman, d v s landskapet kommer att bli allt mera kuperat.

Utvecklingen i den del av dräneringsområdet som utgöres av f d Martebo myr kommer att vara något annorlunda. Detta är dels beroende av den kalkbleke och kalkgyttja som där förekommer i jorden. Observationer längs de i berggrunden nersprängda kanalerna i det tidigare myrområdet, har visat att det under kalkhaltiga sediment förekommer kalkstensytor som är opåverkade av korrosion. Vid den nedre dammluckan i huvudkanalen har jag under kalkrika leriga sediment påträffat en kalkberggrund som fortfarande har kvar sin av isen blankpolerade överyta med tydliga mikroisräfflor (se bild 15). Att kalkhaltiga sediment skyddar den underliggande kalkytan från korrosion har också noterats av prof. D. C. Ford från McMasters University i Canada (personlig kommunikation). Vid mina undersökningar av karstområden i de svenska fjällen har jag konstaterat att finkorniga kalkbemängda lösa avlagringar, t o m av ringa mäktighet, effektivt skyddar underliggande berggrund mot karstifiering, medan kalkfattiga sediment inte utgör något skydd (i t ex Bjurälvens dalgång finns det aktiva karstformer under upp till 33 m mäktiga issjösediment).

Under förutsättning att en jordart har tillräckligt hög halt av finkornigt material, ler och silt, så att perkolationsvattnet får tillräckligt lång tid på sig under passagen ner till berggrunden, att jämviktstillstånd uppnås mellan koldioxiden i vattnet och jordatmosfären bör följande samband vara tillämpligt:

m = det kalkhaltiga jordtäckets mäktighet i meter

$$T = \frac{m \times k}{100 \times d}$$

k = jordens kalkhalt i procent

d = den kemiska denudationen i m/1 000 år

T = antalet 1 000-tals år det tar innan kalken i jorden lösts ut.

Formeln får givetvis enbart betraktas som ett utkast då kornstorleken och jordens permeabilitet är avgörande för hur stor kalklösningen blir i jorden. Enligt diskussionen i början av kapitlet behöver vattnet uppehålla sig i jorden under några dygn för maximal kalkutlösning. Av denna anledning bör framräknat värde ses som ett minimivärde. Tillämpas formeln på Martebo myr blir resultatet cirka 50 000 år. Bleken och kalkgyttjan är cirka 2 m mäktig och har en kalkhalt på 20 - 50% (Lundqvist et.al. 1940). Det landskap som kommer att utbildas, sedan kalken i jorden lösts ut, blir sannolikt av pavementtyp då alla kända karstområden på Gotland är av denna typ (undantaget ett fåtal områden i revkalk). Bild 2 visar ett pavementområde på Gotland.

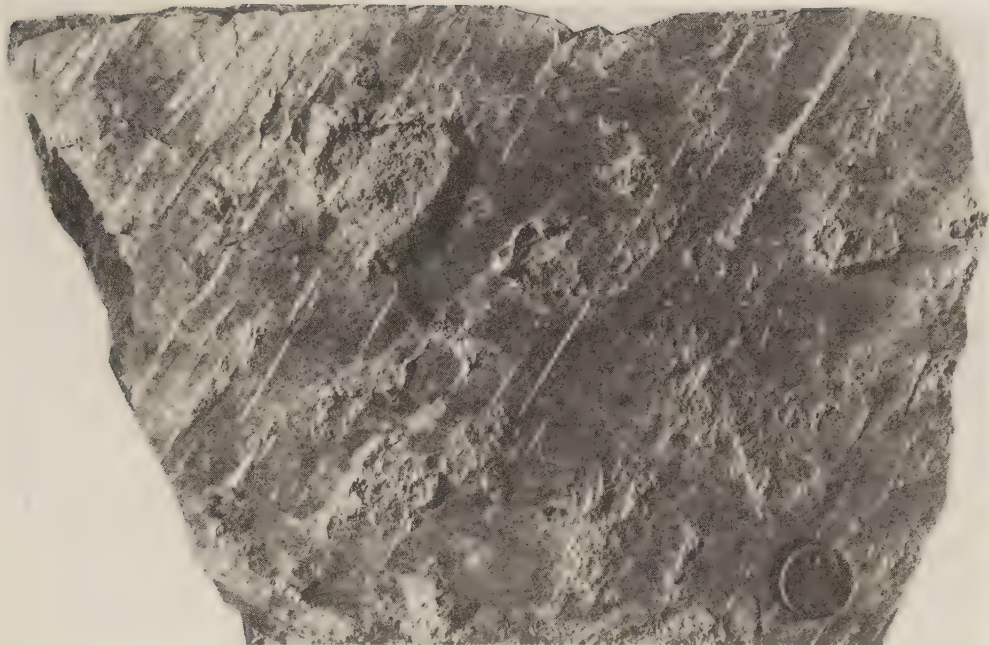


Bild 15. En bit av en glacialt slipad och polerad kalkhäll från Kanalen i Martebo myrs västra del. Stenytan är blankpolerad och inga spår av korrosion finnes. Foto Rezsö Laszlo.



Bild 16. Exempel på kartering med teodolit i vattenförande delar av grottan. Foto Bo Lenander.

LUMMELUNDGROTTAN

I KAPITLEN 7 - 15 BEHANDLAS LUMMELUNDAGROTTAN

7. INTRUDUKTION OCH HISTORIK

ALLMÄNT OM KARSTGROTTOR

De flesta och de största grottorna i världen är karstgrottor. I Sverige är dock de flesta grottorna utbildade i urberg medan de längsta grottorna utgöres av karstgrottor utbildade i kalksten enligt en katalog över svenska grottor, Tell 1963, 1966, 1970 och 1974.

Lummelundagrottan är en av landets tre största kända grottor. Vilken av dessa tre som i realiteten har det längsta gångsystemet går ännu inte att fastställa då ingen av dem är fullständigt utforskade. Jämförelser kan dock göras mellan de uppmätta delarna av grottssystemen och minimilängden på det underjordiska vattendrag, som förekommer i respektive system, d v s avståndet mellan sluk och källa. Ser vi enbart till grottornas utforskade delar så är Lummelundagrottan med sina 2 430 m karterade gångar landets längsta grotta följt av Labyrintgrottan 2 100 m och Sotsbäcksgrottan 1 650 m, båda i Tärnafjällen. Avståndet källa - sluk är för Lummelundagrottan 1 150 m, för Labyrintgrottan 1 800 m och för Sotsbäcksgrottan 2 180 m.

Lummelundagrottans karterade 2 430 gångmeter sträcker sig fågelvägen 480 m in från mynningen. Det betyder att det på var sträckmeter längs en rak linje finns 5,06 gångmeter. Antar vi att detta gäller även i de okända delarna av grottan så blir den uppskattade totala längden av hela gångsystemet $1\,150 \times 5.06 = 5\,821$ m. Gör vi på samma sätt med de två andra grottorna finner vi att Labyrintgrottan har en uppskattad längd av

6 332 m och Sotsbäcksgrottan 7 063 m.

Nu är dessa siffror givetvis enbart att se som prognoser, och som sådana antyder de att de två fjällgrottorna kan utgöra de längsta grottsystemen i Sverige.

Hur stor ter sig då Lummelundagrottan vid en internationell jämförelse? En sammanställning utförd av Bögli (1978) visar att det då fanns 32 grottor med en längd överstigande 25 km, och då räknas enbart antalet utforskade metrar. Som jämförelse kan nämnas att det 1965 bara fanns fem grottor med en känd längd överstigande 25 km. Världens längsta grotta är för närvarande Flint Mammoth Cave System i Kentucky, USA, med en längd av 341 km (oktober 1979 enligt Bruckner).

I jämförelse med dessa giganter är Lummelundagrottan som en liten grotta. Men tittar vi på en storleksgruppering av världens grottor så räknas Lummelundagrottan dock till de större grottorna.

Små grottor	upp till 50 m.	(Efter Bögli, 1978)
Medelstora grottor	50 - 500 m	
Stora grottor	500 - 5 000 m	
Jättegrottor	över 5 000 m	

Vad är då en grotta?

Det finns ett stort antal definitioner, men ingen av dem förklarar egentligen tillfredställande vad en grotta är. Stones definition från 1953 kan stå som exempel: "A cave is a natural cavity beneath the earths surface, whose dimensions are measurable in feet, whose walls are bedrock, and usually extending to absolute darkness". Denna definition förutsätter att alla grottor är belägna under jordytan och att väggarna består av fast berg, därmed uteslutes alla blockgrottor, jordgrottor och isgrottor!

Den hittills enklaste definitionen är kanske också den bästa, i vart fall är den allmänt använd i USA även om vissa karstforskare förkastar den då det är en icke genetisk definition (Ford 1971). "A cave is an underground space of enterable size (Curl 1964).

Lummelundagrottan är unik såtillvida att det är den enda större karstgrottan i Skandinavien med en i det närmaste helt horisontell utbredning, därtill är den till skillnad från fjällgrottorna utbildad i lagrad kalk. Även rent genetiskt hör den till en annan typ av grottor, än fjällgrottorna, nämligen s k "watertable caves".

Lummelundagrottan är också unik därför att den är den enda kända större karstgrottan i Skandinavien utanför fjällkedjan. Närmast i storlek ligger Balsbergsgrottan (norr om Kristianstad) som är uppmätt till mindre än 100 m i längd. Egendomligt nog finns det inga större kända karstgrottor på Öland och Gotland utöver Lummelundagrottan. Jag anser det dock möjligt att den kan finnas sammanhängande hålrum av ansevärd längd och storlek dolda i berggrunden både på Öland och Gotland. Så tyder t ex dolinfältet vid Resmosprickan, Öland, på förekomsten av ett större grottsystem.

På Gotland finns ett antal karstkällor som kan misstänkas stå i förbindelse med underjordiska hålrum. Av dessa är det främst källorna vid Kohlens Kvarn (5 km N Visby) och vid cementfabriken i Visby som jag håller för troligt står i kontakt med grottsystem. I övre delen av Trolldalen vid Stenkumla finns två mindre karstgrottor vars fullständiga utforskning hindras av att de delvis är fyllda med jord.

Lummelundagrottan är alltså en för Skandinavien unik geovetenskaplig företeelse och den bör därför skyddas och bevaras så intakt som möjligt. Då grottan numera besöks av över 100 000 turister per år har den också fått ett stort värde som enskilt turistobjekt.

UTFORSKNINGEN AV GROTAN

För orientering i grottan i samband med de namn som förekommer i texten hänvisas till kartan över Lummelundagrottan, fig.41.

Lummelundagrottorna är en pluralisbeteckning som flera tidigare författare använt sig av vid beskrivning av grottan. Det är emellertid mig helt obekant varför detta uttryck har använts för att beteckna ett sammanhängande grottsystem, d v s en enda grotta. Måhända syftar det ursprungligen också på de små

strandgrottor som förekommer i klinten. Hur som helst bör grottan fortsättningsvis benämnas i singularis så länge beskrivningen berör kända delar av grottan eller delar som av starka skäl kan misstänkas stå i förbindelse med Lummelundaströmmens underjordiska passage mellan slukhålén och Överste-kvarn.

"Strömmen vid Öfverste-Qvarn är deruti mycket underlig, att han, sedan han tagit sin begynnelse i Martebo Träsk, går därifrån vid pass 1/16 mihl under jorden, under Berg och Dahlar, och änteligen kommer upp vid Öfverste-Qvarn, där Land-Borgen emot västra sidan är afbruten, där han utlöper lik som utur ett hvalf af 2 famnars bredd och 1 famns högd". Så lyder den första publicerade skildringen av Lummelundagrottan i Linnés "Öhländska och Gotländska Resa" från år 1745.

Men grottan hade redan dessförinnan tilldragit sig intresse av vetenskapsmän. 1702 beskrevs den underjordiska vattenströmmen av Urban Hjärne i en rapport till regeringen om malm och bergarter. Det kan förefalla märkligt att grottan och Lummelunda omnämnas i en dylik rapport, men strax utanför grottnynningen bildar ån ett fall vilket har utnyttjats som kraftkälla.

År 1799 besökte arkivarien och konstnären C.G.G. Hilffeling Lummelunds bruk. I hans handskrivna reseskildring, som förvaras på Kungl.Biblioteket i Stockholm, skildras förutom bruket även grottan och den underjordiska strömmen (Hjärne och Hilffeling ref. från Lundberg 1939).

1886 beskriver Lindström en del karstförekomster på Gotland och nämner då bl a den underjordiska strömmen vid Lummelunds bruk.

1917 besökte H.Munthe grottan och mätte upp den. Av beskrivningen i "Strandgrottor och andra närstående fenomen i Sverige" från år 1920, framgår det att han enbart besökt själv mynningsgrottan och inte försökt följa vattenströmmen in i berget. Munthe beskriver grottan som en kombinerad strand- och utlösningsgrotta 1920, medan han 1924 beskriver den som en strandgrotta utbildad av Litorinahavet. I båda arbetena benämner han grottan Kytt Jans källare, ett namn som han hänför till F.A. Sæve. Denna mynningsgrotta har sedermera kommit att kallas

Linnés grotta, ett namn som Munthe i sin skrift från 1920 gett till en grotta i Torsburgen. Enligt Munthe är alltså Kytt Jans källaren det korrekta namnet på Lummelundagrottans mynning. Tell (1955) menar att namnet säkert associerar till det faktum att grottan använts såsom jordkällare.

Enligt tillgängliga uppgifter var Torsten Gislén den förste, som gjorde ett försök att tränga innanför själva mynningsgrottan. Detta skedde 1924. Ett år senare försökte sig speleologen Leander Tell på samma sak med lyckat resultat. Tell gjorde sedan under loppet av flera år upprepade besök i grottan och trängde allt djupare in i densamma. Främsta hindren var de djupa bassängerna (Kanalerna, se fig.41) och de trånga labila passagerna. Hur Tell och hans medhjälpare så småningom bemästrade dessa svårigheter finns utförligt beskrivit i hans bok "Underjordens vackra värld" (1955).

1933 upprepade Gislén sitt besök i grottan för biologiska studier. Dessa fortsatte sedan under somrarna 1945-47 och 49-50 tillsammans med Per Brinck och resulterade i två publicerade arbeten (Gislén & Brinck 1948, 1950).

Under första halvan av 1950-talet ägnade tre pojkar från Visby grottan ett stort intresse. Örjan Håkansson, Percy Nilsson och Lars Olsson lyckades under åren forcera de trånga djupa vattenkanalerna men sedan var det stopp fram till 1954. Det året inträffade ett mindre ras i taket vid punkten N i fig.31. Raset blottlade en trång öppning som de lyckades tränga sig igenom. De kom därvid ut i en 20 m lång delvis lerfylld gång som de lyckades klämma sig fram genom. Gången, sedermera döpt till "Pojkarnas gång" mynnar i den del av grottan som idag är öppen för visningar.

1955 ordnades en större expedition in i de nyupptäckta delarna av grottan. Förutom upptäckarna själva deltog Leander Tell, Carl-Fredrik Lundevall, Gunnar Olsson och fotografen Lennart Nilsson. Fig.31 visar den kartskiss som därvidlag upprättades av Tell. Kartan visar hur grottan såg ut före ombyggnaden till visningsgrotta.

Under de kommande nio åren skedde inga större nyupptäckter i grottan, men 1959 inträffade en viktig händelse i Lummelundagrottans historia. Ett för ändamålet speciellt bildat bolag

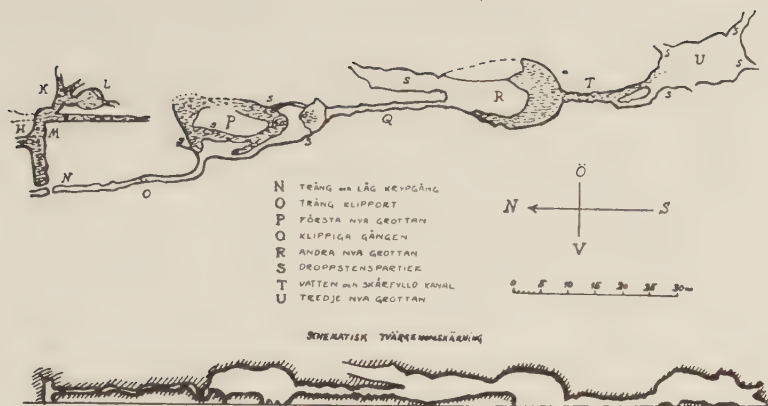


Fig. 31 Lummelundagrottan efter Tell (1955). Övre delen plan-skiss och nedre tvärprofil över grottan mellan Kanalerna (vänster) och Sal 5. Kartan visar hur turist-delen av grottan såg ut före utbyggnaden.

lät spränga en tunnel in till den nyupptäckta delen av grottan i avsikt att öppna den för turister. Tunneln färdigställdes på hösten samma år och de första salarna kunde visas för turister. 1961 hade visningsdelen byggts ut i den utsträckning som gällde fram t o m 1978.

1964 genomförde Lundevall en karstomorfologisk undersökning av grottan och tillhörande ytområde. Mot slutet av undersökningen fann han i den innersta delen av den då kända grottan (mellan Sal 5 och Sal 6) en dold passage, som ledde ner till en låg, delvis vattenfylld sal. Därifrån öppnade sig nya helt okända gångar, som man vid detta första tillfälle inte hann undersöka. Några dagar senare inledde emellertid Gunnar Olsson en omfattande undersökning och kartering av de nyupptäckta grottpassagerna. 1965 presenterar han tillsammans med Lundevall en karta i Geografiska Annaler samtidigt som de anger den sammanlagda längden av alla uppmätta gångar till 1 285 m.

Sveriges Speleolog-Förbund har, sedan bildandet i mitten av 1960-talet, visat ett starkt intresse för Lummelundagrottan. Men någon planmässig utforskning har ej kunnat bedrivas under jord då ingången till grottan varit låst och ägarna till denna del av grottan ej funnit sig föranledda att uppmuntra utforskning av grottgångar belägna under annans mark. SSF har därför

med olika metoder försökt spåra de inre delarna av grott-systemet från markytan.

Medelst en elektromagnetisk metod (slingram) har vi till vissa delar fastställt utsträckningen av Lummelundaströmmens underjordiska lopp innanför grottans kända delar (Lindén 1975 beskriver det inledande försöket).

En TV-kamera och mätutrustning har sänkts ner i brunnshålet vid D på detaljkartan och den underliggande grottan har på så vis kunnat studeras och delvis karteras. (Åström 1975).

Sedan dess har grottan besökts av medlemmar från Sveriges Speleolog-Förbund i samband med undersökningar av J.Åkerman (klimatet i grottan, U.Helldén (karstkemi) och A.H.Lindén (bergmekanik) varvid en del nya gångar konstaterats. Men något mera planmässigt underjordiskt utforskningsarbete har inte kunnat utföras förrän i samband med föreliggande undersökning där vi har karterat om hela det kända grottsystemet med modern karteringsutrustning. Vi har därtill funnit och karterat ca 1 150 m nya gångar. Av dessa sammanlagt över en km nya gångar som upptäckts och karterats har något över 300 m hittats i det aktiva systemets (vattenförande) inre delar genom dykning och torrläggningar av vattenlås. Resterande har upptäckts i det fossila systemet (torra delarna av grottan) genom fynd av nya tunnlar och genom att forcera passager som dittills ansetts för trånga.

Trots en intensiv arbetsinsats kan grottan ännu inte anses som fullständigt utforskad. I grottan finns inte mindre än åtta ställen, markerade med frågetecken i fig.41, där det eventuellt går att tränga vidare in i systemet. Vid de två frågetecknen i den vattenförande delen av grottan samt vid Inre sjön kräver en fortsatt utforskning att dykarutrustning användes eller att sjösystemen tillfälligt torrlägges. De två frågetecknen vid Brevlådesalen kommer att kvarstå som frågetecken då passagen där hindras av droppstenar vars fortlevnad är viktigare än att de två gångarna kartlägges. För två av de andra krävs att stora mängder sediment grävs bort innan vidare passage kan ske.

Nu får ovanstående inte tolkas som en absolut sanning. Erfarenheten har visat att nya passager ständigt upptäcks i till synes välutforskade grottor, varför det är troligt att det

kommer att hittas nya passager utöver de ovan nämnda åtta frågetecknen. Grottan har ju vid tre tidigare tillfällen ansetts som färdigutforskad tills oväntade fynd har påvisat att så ej var fallet. Därför vill jag klart framhålla att grottans utsträckning till stora delar ännu är helt okänd. Vidare är de här genomförda klimatologiska och biologiska undersökningarna långt ifrån definitiva - tvärtom kräver båda uppföljning i framtiden. I ännu högre grad gäller detta sedimenten i grottan, där föreliggande undersökning enbart är att se som en inledning till kommande undersökningar.

Lummelundagrottan är alltså långt ifrån ett avslutat kapitel för den speleologiska forskningen.

TURISMEN

Efter genombrottet 1954, då den nuvarande visningsdelen av grottan upptäcktes, fick Lummelundagrottan en hel del publicitet (Tell 1955). Detta medförde en stark ökning av besöksfrekvensen även om besökarna fick nöja sig med att titta in i själva mynningsgrottan. Ett besök i den inre nyupptäckta delarna krävde nämligen både kunskaper och utrustning.

Redan före upptäckten av de inre grottosalarna med dess spektakulära droppstenspartier hade Leander Tell arbetat för upptagandet av en tunnel in till de då kända delarna av grottan (Tell 1955, 1977). 1959 realiserades dessa planer genom bildandet av AB Lummelundagrottorna. En tunnel färdigställdes samma år in till "Bergakungens sal" och året efter öppnades grottan för turister. 1961 var grottans visningsdel fullt utbyggd i den omfattning, fram till sal 5, som gällde fram till 1978. I mars 1978 påbörjades arbetet med den nya tunneln in till Sal 6. Denna tunnel tjänar sedan 1979 som utgång för de guidade turistgrupperna.

De arbeten som utförts i själva grottan är följande: skrotning av tak och väggar, utrensning av skrotsten och redan befintliga lösa block, stödgjutning av labila partier samt uppsättande av gjutna stödpelare, igenfyllning av djupare bassänger (speciellt i Kapellet), gjutning av betonggolv, uppsättning av räckan och elektrisk belysning samt skyddsnät framför vissa droppstensformationer. Vidgning av den trånga passagen

mellan Sal 5 och Kapellet samt montering av en väggfast spång i densamma (djupt vatten under). De mest omfattande ingreppen i grottan har gjorts i samband med upptagningen av den nya tunneln 1978 - 1979. I Sal 6 fanns den största kända ansamlingen av nedfallna block i grottan, dessa har helt avlägsnats. Omfattande skrotningsarbeten har också utförts i Sal 6 och skrotstenen transporterats bort. Mellan Sal 5 och Sal 6 har en ny förbindelse tunnel sprängts varvid en del fast berg och rasackumulationer i Sal 5 har avlägsnats. Förändringarna i dessa partier behandlas mera detaljerat i nästa kapitel.

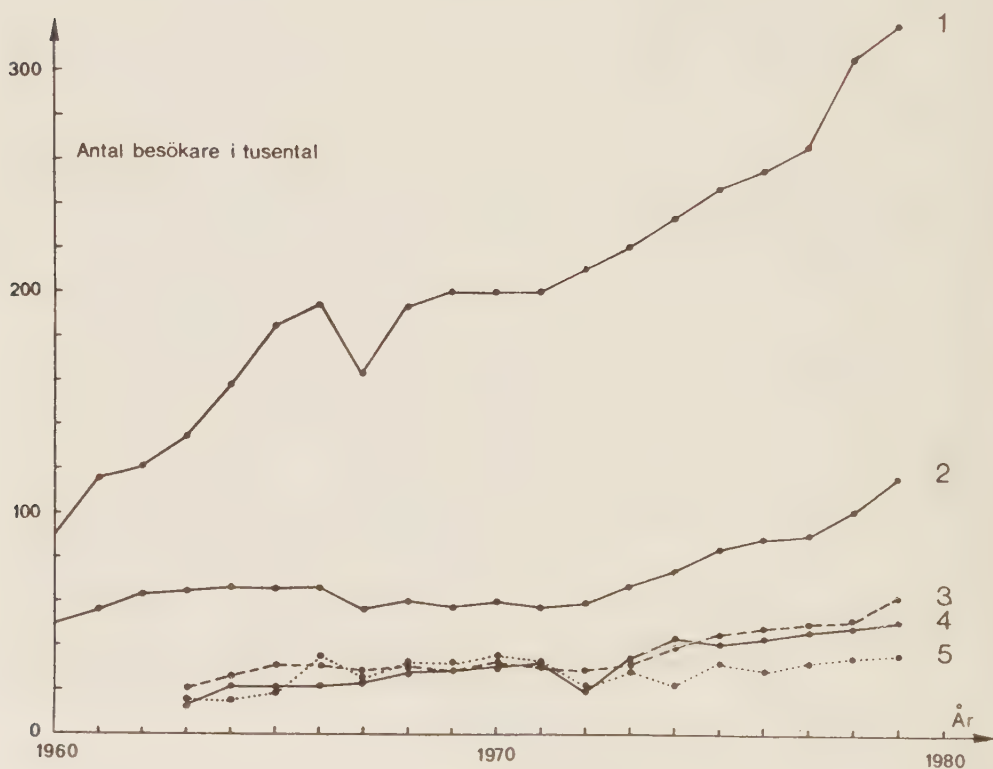


Fig. 32 Antalet turister som per år besökt

1. Gotland
2. Lummelundagrottan
3. Bungemuseet
4. Visby ruiner
5. Gotlands fornsal

Besöksstatistiken för Lummelundagrottan från år 1960 (öppningsåret) till 1979 är redovisad i fig.32. I samma diagram illustreras också det totala antalet turistbesök på Gotland under perioden samt antalet besökare till de näst efter Lummelundagrottan mest publikdragande turistattraktionerna. Det statistiska underlaget till kurvorna har erhållits från Gotlands Turistförenings årsberättelser för åren 1960-78 samt från Gunnar Ödin, Lummelundagrottans AB, och från Torgny Andersson, Gotlandsresor AB.

Samtliga i fig.32 och 33 redovisade värden gäller för sommarperioden mellan 1.5 och den 15.9.

Som figurerna visar är Lummelundagrottan den största turistattraktionen på Gotland. Redan under det första året då grottan var öppen för turister besöktes den av cirka 50 000 personer. En viss ökning skedde året därpå och 1962 besöktes grottan av 63 000 personer. Men mellan 1962 och 1972 låg besöksfrekvensen relativt oförändrad kring 60 000 personer och år trots att tillströmningen av turister till ön under samma period ökade från 120 000 till 210 000. Detta förhållande illustreras bättre av kurva nr 2 i fig.33, som visar besökarantalet i grottan i procent av den totala gotlandsturismen. Av figuren framgår det att de andra tre turistmålen har bibehållit sina procentuella andelar under samma tid.

1978 skedde en kraftig ökning av antalet turister till ön. Denna ökning, 40 000 personer, återspeglas i besöksstatistiken för de enskilda turistobjekten. 1979 var den totala ökningen av besökare till ön "bara" 15 000, men ändå ökade antalet besök till de enskilda turistmålen mer än året innan. (Fornsalen undantagen).

1974 publicerade Dr Habe, kommissionen för turistgrottor i Internationella-Speleolog-Unionen (UIS), en lista över 189 av världens turistgrottor. I denna lista placerade sig Lummelundagrottan på 35:e plats när det gällde antalet besökare per år (i inventeringen saknas dock uppgifter från en del länder bl a USA). Besökarantalet i Lummelundagrottan angavs då till 68 500 (1973 års siffra), men sedan dess har antalet besökare per år ökat kraftigt. 1979 besöktes grottan av 117 511 personer. Detta gör Lummelundagrottan till ett av

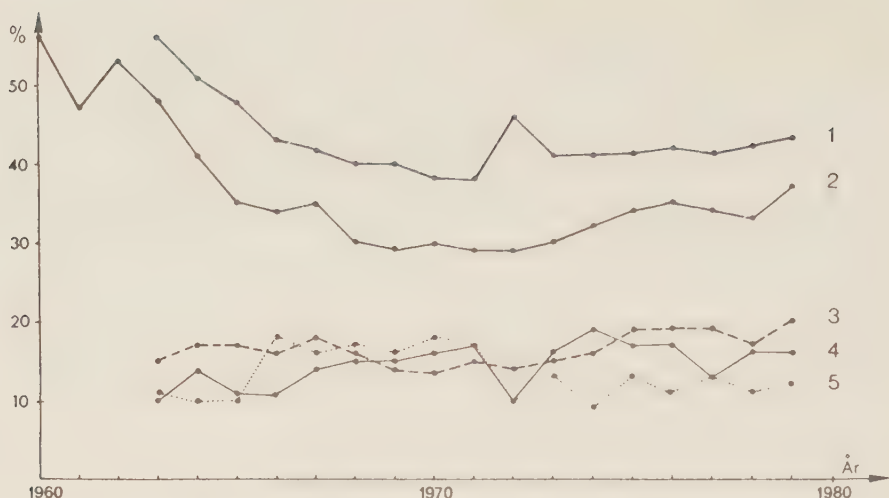


Fig. 33 1. Besökare till Lummelundagrottan i % av alla besök till de fyra turistobjekten
 2. Besökare till Lummelundagrottan i % av alla turistbesök till Gotland
 3. Bungemuseet i % av gotlandsturismen
 4. Visby ruiner i % av gotlandsturismen
 5. Gotlands fornsal i % av gotlandsturismen.

landets mest besökta enskilda turistobjekt, visserligen är tillgänglig statistik bristfällig - det enda samlade material tycks vara en några år gammal "tio-i-topp-lista" som ställts samman av Sveriges Turisttrafikråd, och den listan omfattar enbart komplexa objekt typ Skansen. Det enda enskilda objekt jag lyckats spåra med flera besökare än Lummelundagrottan är regalskeppet Wasa som sedan 1980 haft mellan 245 000 och 453 000 besökare årligen.

Grottan är öppen för turistvisning under fem månader om året, från maj till september. Cirka 50% av alla besök sker i juli och cirka 75% mellan den 10.6 och den 10.8. Besökens fördelning under hela femmånadersperioden framgår av fig.34 där det ackumulerade besökarantalet lagts in.

Fram till 1979 hade grottan en begränsad kapacitet när det gällde antalet besök per dag. Visningsdelens ringa storlek och trånga passager tillsammans med det faktum att besöksgrupperna fick vända i Sal 5 och gå samma väg ut igen där de då hade att

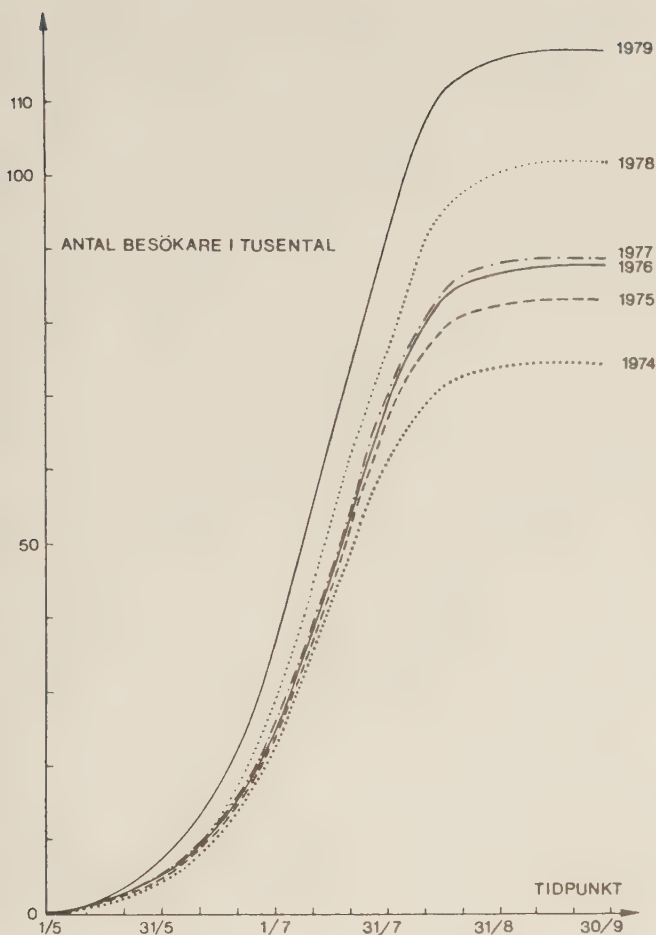


Fig. 34 Det ackumulerade antalet besökare per år i Lummelundagrottan för perioden 1.5 till 30.9 under åren 1974 - 1979.

passera grupper på väg in, gjorde att det högsta praktiska besökarantalet låg kring 1 500 personer per dag.

Arbete med en ny tunnel påbörjades i mars 1978 och sommaren 1979 hade visningssalen byggts ut till Sal 6 där den nya tunneln nu mynnar. Turistgrupperna går nu in genom den äldre tunneln och ut via den nya. Besökarna får se grottan i ett lugnare tempo och därtill se mera av den. Mest positivt är att de tidigare bökiga och irriterande mötena mellan olika visningsgrupper i de trånga utrymmena nu är eliminerade.

Trots en kraftig ökning av antalet besökare under 1979 var förhållandena i grottan betydligt bättre för både turister och guider. Den 12.7 1977 besöktes grottan av 2 304 personer, omständigheterna betecknades då av guiderna som smått kaotiska.

1979 överskreds detta rekord vid tre tillfällen, med som mest 2 529 besökare den 19.7 1979, utan några större problem. En bidragande orsak till den markanta ökningen av besökare mellan 1978 och 1979 kan, utöver vad som tidigare sagts, vara att väntetiden efter utbyggnaden har reducerats. Tidigare avstod åtskilliga personer från ett besök p g a de långa köerna.

Lummelundagrottan är en av landets största karstgrottor och den mest turistvänliga med tanke på läge, tillgänglighet, utformning samt sitt för svenska förhållanden rika innehåll på droppstensformationer. Den är också ett av landets mest besökta enskilda turistobjekt. Av dessa anledningar är det av stor vikt att grottan även fortsättningsvis förblir tillgänglig för besökare. Önskvärt är också att besökarna ges möjlighet att sätta in grottan i dess geovetenskapliga sammanhang och att de i samband med detta även får tillfälle studera övriga karstformer i området. Av denna anledning har grottan med ovanförliggande karstområde föreslagits till naturreservat.

När det gäller människans utnyttjande av grottan inställer sig genast en intressant fråga: Har Lummelundagrottan varit bebodd? Tyvärr finns det inga bevis för att så har varit fallet. Då det är känt att andra grottor i regionen varit bebodda, den mest berömda är Stora Förvar på Stora Karlsö, finner jag det inte omöjligt att även Lummelundagrottan har utnyttjats av människan som bostad. Det är i så fall enbart de yttre delarna som har utnyttjats då förbindelsen in till de inre delarna av grottan var dold ända fram till 1954. Det bör dock ha varit problem under vårfloden då större delen av golvet i grottans yttre delar spolats över av vatten. Detta kan också förklara varför inga fynd av kulturlager m m har gjorts då allt skräp sköljs bort varje år.

Gislén & Brinck (1950) beskriver emellertid ett fynd de gjort på en klipphylla en bit in i grottan. De fann på 1,5 m höjd över havet en halskota av ett gotlandsruss som de förmodade hade drunknat uppe i Martebo myr och att resterna sedan spolats ner genom slukhålen för att slutligen sköljas upp på klipphyllan. De djupa bassänger och vattenlås vi funnit i grottan utesluter emellertid att en ryggkota kan ha transporterats

genom grottsystemet, dessutom stiger vattnet i den delen av grottan inte med 1,5 m under högvatten. Enda tänkbara förklaring är att kotan och eventuella andra delar av kadavret förts in i grottan av något rovdjur eller en människa.

Gyttjig lera i kotan lämnades till Tage Nilsson, geologiska institutionen i Lund, för pollenanalys. De pollen Nilsson fann passade väl in i ett existerande pollendiagram (från Lunquist 1940) från Martebo myr. Det passade även in i andra diagram från Gotland och indikerade att sedimenten härstammade från sub-boreal tid (500 - 2500 f Kr). Då denna lagerföljd ligger 90 - 120 cm under myrytan är det knappast troligt att någon grävt upp kotan och sedan placerat den i grottan. Troligare är då att den placerats där under sub-boreal tid.

Om kotan placerats i grottan av ett djur har detta djur fått simma in i grottan på grund av vattendjupet medan en människa kan vada in. Då kotan inte heller hade några spår av tänder är jag mera benägen tro att en människa har lämnat den i grottan. Detta är givetvis inget bevis för att människor har bott i grottan men det indikerar att människor för tusentals år sedan kan ha utnyttjat grottan. Grottan bör ha varit en idealisk tillflyktsort för de tidigaste invånarna på Gotland då ju källan är vattenförande året runt och grottan själv utgör ett gott skydd mot klimatet. (Se slutet av temperaturavsnittet i kapitel 13).

8. UNDERSÖKNINGSMETODIK OCH UTRUSTNING

Inledningsvis vill jag nämna att det arbete som utförts i grottan har skett i en såväl fysiskt som psykiskt krävande miljö. Fukten, kylan, mörkret och smutsen ställer stora krav på både folk och utrustning. Vid all vistelse under jord har hjälm och skyddskläder använts. Till belysning utnyttjades hjälpkarbidlampor i kombination med elektriska handlampor.

KARTERINGEN

Genom hela grottan har ett polygontåg dragits, kring vilket grottans form sedan har mätts in och skissats upp. I det aktiva systemet, där Lummelundaströmmen rinner fram, har polygontåget upprättats med hjälp av teodolit och precisionsmåttband (se bild 16). Då utrymmet i grottans fossilia delar ej tillät användandet av teodolit har där istället syftkompass, av märket Suunto typ KB-14/360, använts, noggrannhet $0,5^{\circ}$. Avvägningen har där utförts med en klinometer av typ Suunto PM-5/360 PC, noggrannhet $0,5^{\circ}$. Polygonpunkterna har markerats med islagna stålspik och numrerade lappar av självlysande plast. Där så har ansetts meningsfullt har grottgångarnas profiler dokumenterats. Till detta har en specialkonstruerad profilograf använts.

I de fall gångarna har varit alltför trånga för att tillåta passage, men misstankar har förelegat om att dessa stått i förbindelse med andra framkomliga gångar, har en särskild portabel ljudkälla utnyttjats. På så vis har mynningarna till en del alltför trånga förbindelsegångar kunna karteras in medan själva förbindelsen, vars exakta utsträckning ju ej är känd i detalj, har markerats med streckade linjer på kartan. Där polygontåget upprättats med hjälp av kompass har varje punkt kontrollerats genom avläsning såväl bakåt som framåt. Vid några av polygonpunkterna har det då konstaterats en oförklarlig deviation på upp till 5° . För att på ett enkelt sätt kunna kontrollera polygontåget har vi använt oss av en radiosändare som placerats på ett antal punkter i grottan. Sändarens läge har samtidigt pejlat in på markytan punkt för punkt. Polygontågets vinklar och avstånd kunde sedan kontrolleras på markytan med hjälp av teodolit. Denna metod medförde att grottans utsträckning i detalj kunde följas på markytan. Radiopejlingen gav också en annan oväntad bieffekt vilken diskuteras i nästa avsnitt.

Ett av de större problemen i samband med karteringen, och förutom vid allt annat underjordsarbete, var att föra anteckningar. Den enda möjliga kombinationen visade sig vara ritplast och blyerstpenna. Men inte ens detta var helt tillfredställande. När anteckningarna tvättades rena från lera hände det inte sällan att skriften var mer eller mindre utplånad.

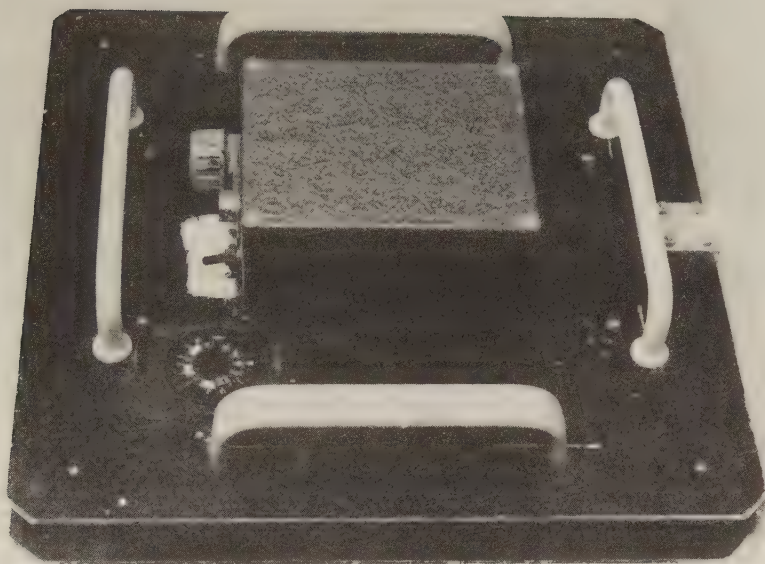


Bild 17. Fotoprofilograf. I mitten av de parallella plåtarna sitter en blixtlampa. Ovanpå behållaren med blixtaggregatet (mellan bärhandtagen) sitter en dosibell för nivellering. Foto Mischa Gavrjusjov.

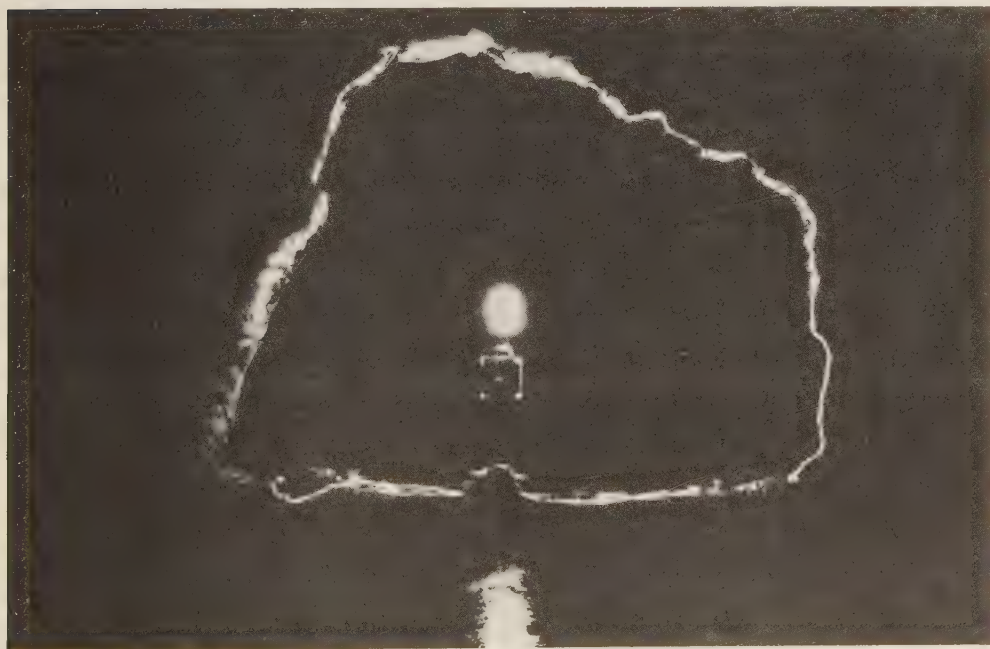


Bild 18. Avfotograferad profil av grottgång. Den kraftiga ljuspunkten är en pannlampa, de fyra mindre punkterna är hål i profilografen och längst ner i bilden ljusreflex i vattnet. Foto SSF.

SPECIALKONSTRUERAD UTRUSTNING OCH UTNYTTJADE DETEKTERINGSMETODER

I detta avsnitt behandlas den specialutrustning som konstruerats och använts i undersökningarna av Lummelundagrottan. Idéerna har kläckts och genomförts av enskilda medlemmar i Sveriges Speleolog-Förbund vilkas yrken och specialintressen gjort det möjligt för dem att konstruera eller låna behövlig utrustning.

Profilograf

Idén till profilografen kommer från G.Nagy vid 1973 års spelologkongress (Nagy 1977). Hans ungerska apparat var emellertid klumpig och svår att konstruera. Grundidén, att med en smal ljusspalt belysa en profil av grottgången samtidigt som den fotograferas av, utvecklades vidare av ing. Lars Erik Åström. I samarbete med Leif Johansson, Sven Gunnvall och Åke Thorsén tillverkades en fotoprofilograf, som vid test i Lummelundagrottan visade sig vara synnerligen effektiv.

Apparaten består av tre parallella kvadratiska aluminiumplåtar. I centrum sitter ett elektronblixtrör monterat vinkelrät mot plåtarna (se fig.36 och bild 17). Apparaten har beskrivits i detalj av Åström 1978.

När profilografen användes placeras den i grottgången med skivorna vinkelrät mot gångriktningen och orienteras i vertikal läge med en fast doslibell. Då blixten utlöses kommer ljuset från blixtröret att av plåtarna avskärmats till en smal ljusspalt som strålar radiellt ut från apparaten. På ett bestämt avstånd framför profilografen ställs en kamera med vidvinkelobjektiv och full bländaröppning. Kameran slutaren öppnas och blixten utlöses varvid en registrering av gångprofilen sker, se bild 18. Ljuspunkten i mitten av bilden är pannlampan på den person som håller profilografen, ljusfläcken nederst i bilden är reflexer av pannlampans sken i vatten. Ljusspaltens bredd är beroende av avståndet mellan apparaten och grottgångens vägg (sträckan L i fig. 36), av avståndet mellan plåtarna (avståndet d i fig.36) samt avståndet mellan ljuskälla och den avskärmade plåtens kant (b i fig.36). För att få en smalare ljusspalt monterades en extra skiva mellan de två ytterplåtarna,

gångbredd och takhöjd i kartorna istället för att mäta detta på plats i grottan längs polygontåget. Den praktiska noggrannheten ligger kring en dm. Nagy (1977) anger noggrannheten på sin profilograf till $\pm 1,6$ mm. För att man skall erhålla större noggrannhet bör ljusspalten minskas till ett minimum vilket lämpligast görs med en torusformad lins kring ljuskällan eller mer punktformad ljuskälla och smalare mellanrum mellan plåtarna. Avskärningsplåtar bör göras cirkulära för att man skall erhålla en jämn bredd på ljusspalten varvet runt.

Radiopejling

Vid den tidigare nämnda radiopejlingen placerades en cirkulär flervarvig ramantenn med centrum vid den punkt i grottan, som önskades inpejlad på markytan. Sändaren, som arbetade på frekvensen 3525 KHz, gav fyra W utmatad effekt (något lägre i praktiken) till antennspolen. Fig.37 visar ett schematiskt tvärsnitt genom berggrunden där den cirkulära sändarantennen A är placerad över polygonpunkten B. Från A utgår elektromagnetiska fältlinjer mot markytan. Rakt över A går fältlinjerna vertikalt upp mot nollpunkten P som är belägen rakt över mät-punkten B. Ju längre från nollpunkten P desto mindre blir vinkeln V då fältets lutning ökar med avståndet från P. Nollpunkten kan alltså pejlas in genom att bestämma lutningsvinkeln på fältlinjerna med hjälp av en mottagare med riktningskänslig antenn. När nollpunkten P är bestämd kan berggrundens mäktighet D beräknas genom att mäta den vertikala fältvinkeln V på det kända avståndet X från P (Ellis 1976).

$$D = \frac{2 X}{\sqrt{(9 \operatorname{tg}^2 V) + 8}} - 3 \operatorname{tg} V$$

Nollpunkten kan också bestämmas genom att mäta signalstyrkan, metoden är dock något mera oviss då sprickzoner och grottgångar kan påverka signalstyrkan. Under arbetets gång konstaterades att gångarnas riktning kunde bestämmas på markytan genom att signalstyrkan var mera uthållig i gångens längdriktning. Fig.38 visar signalstyrkan sådan den kunde avläsas på markytan ovanför grottan. Detta är alltså en metod som skulle kunna tillämpas för att från markytan kartera utbredningen av gång- och spricksystem.

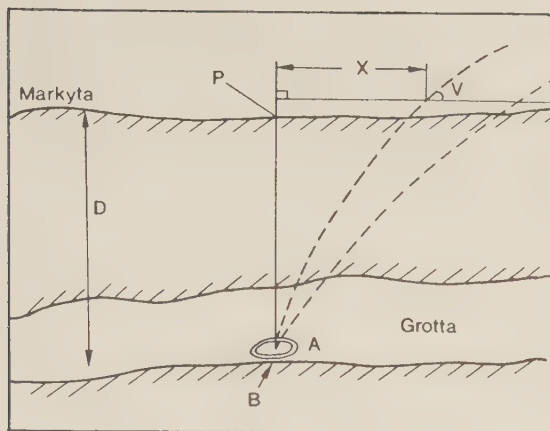


Fig. 37

A = radiosändare
 B = antennspole
 P = nollpunkten på markytan
 Streckade linjer = elektromagnetiska fältlinjer, det är vinkeln, V , på dessa som pejlas in med mottagaren.

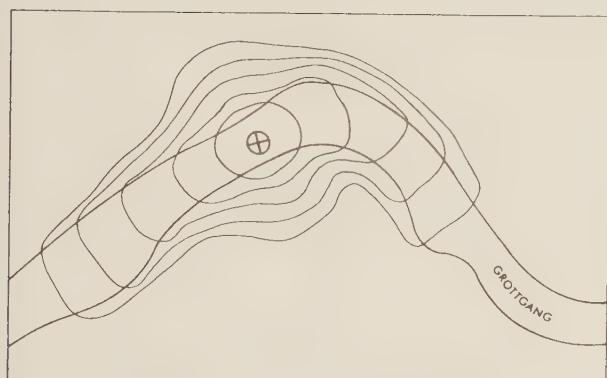


Fig. 38

Spridning av radio-
 vågor i fast berg
 och i grottgång.

Radiopejlmetoden har provats ända ner till 60 m djup enligt Raulet (1975). Han använde därvid en sändare på 10 KHz (ända upp till 20 MHz kan användas enligt Gregor & Princ 1975) och kunde genom kontrollmätning med teodolit konstatera ett medelfel på två m i horisontalled. Nu är precisionen delvis beroende på pejtlarens skicklighet, i detta sammanhang vill jag därför nämna att radiopejlingen i Lummelunda utfördes av ing. Bo Lenander som är flerfaldig svensk mästare i radiopejling, skrävjakt. Lenander (1978) har beskrivit den först utförda radiopejlingen mera i detalj.

I juni 1980 utfördes ytterligare radiopejling med en nykonstruerad apparatur på 2 KHz, även den konstruerad av Lenander. Mottagningen genom 19 m berg var mycket god och inpejlingen på

markytan föreföll att ligga under en meters felmarginal (bestämt genom att upprätta ett slutet polygontåg mellan pejlpunkterna och jämföra detta grafiskt med sändarpunkterna i grottan). Apparaturen var även försedd med utrustning för telegrafi så att tvåvägskommunikation kunde upprätthållas mellan grotta och markyta.

Akustisk sändare

Den portabla ljudkälla som användes vid inkarteringen av oframkomliga grottgångar konstruerades av Lars Erik Åström. Ljudkällan består av en liten elektronisk sirén, Cybertone, som alstrar en hög svepande ton på 1 000 till 2 500 Hz. Sirenen (inkl. batterier) byggdes in i ett 47-mm plaströr varvid ett riktat ljud erhöles. Längden på plaströret (300 mm) anpassades så att resonans uppstod. Möjligen var frekvensen väl hög då ljudet tenderade att absorberas av bergväggarna.

Slingram

Försök har utförts att från markytan spåra de delar av grottsystemet som inte utforskats under jord. Därvid har bl a en i dylika sammanhang ny metod testats.

Slingrammetoden är en elektromagnetisk metod som utvecklats för malmprospektering av SGU (Sveriges Geologiska Undersökningar) under 1940-talet. Metoden bygger på att två horisontella antennspolar (ramantennar) bärs fram genom terrängen med ett fixerat avstånd mellan varandra. De båda antennramarna är förbundna med en kabel som sträcktes vid varje punktmätning. Vid mätning skickas en växelström på 2-18 KHz genom sändarramen varvid ett elektromagnetiskt primärfält uppstår. Elektriska ledare i berggrunden kommer att ge upphov till ett sekundärfält. Styrkan av detta fält avläses via instrument som sitter på mottagarramen, förekommande anomalier registreras i procent av primärfältet. Djupkänningen är något mindre än avståndet mellan sändare och mottagare (för närmare beskrivning se Rudyard 1972 och Lindén 1975).

Den elektriska ledaren i Lummelundaområdet förutsattes vara Lummelundaströmmens underjordiska vatten (ledande genom de salter som förekommer i vattnet). När mottagardelen förs fram över den underjordiska vattenkanalen tänktes imaginärdelen

öka. Ett metodförsök visade att vattnet gav tydligt utslag, metoden var alltså tillämpbar.

Mätningar utfördes först längs utstakade linjer som bildade ett rutnät, det senare var nödvändigt då kabeln mellan ramarna bör bilda 45-90⁰-vinkel med den vattenförande kanalen. Avståndet mellan avläsningspunkterna var 10 eller 20 m, 10 m är att föredra men tidsåtgången fördubblas. Mätgruppen utgörs av tre personer. När mätbordstackymeter senare utnyttjades istället för utstakning behövdes fem personer men mätningen gick då mångdubbelt snabbare. Fig.39 visar resultatet från ett mindre område (vid punkt D i fig.3). I kartan har anomalierna markerats i procent av primärfältets styrka. Den inlagda linjen från brunnen är bergsing. A.H. Lindéns förslag på Lummelundaströmmens sträckning i området. Fig.48 visar samtliga de anomalier som har tolkats som vattenådror.

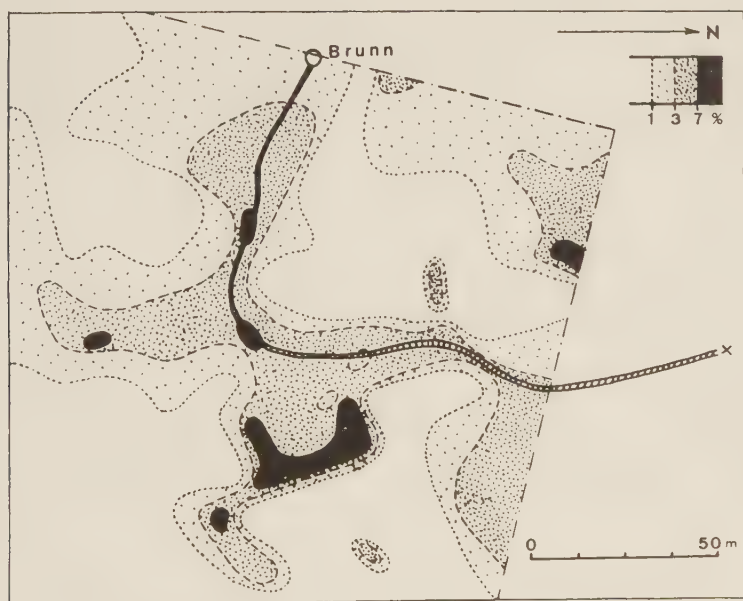


Fig.39 Karta över ett slingram-testat område (brunnen D i fig.4). Imaginärkomponenten uttryckt i % av det primärfält som sändaren alstrar. X markerar Lummelundagrottans förmodade sträckning. (Efter Lindén 1975).

VLF-metoden:

VLF-metoden bygger på samma principer som slingram-metoden, skillnaden är att man utnyttjar en fast sändare. Sändarna, som är belägna på långt avstånd (ex. Sovjet, England, USA) sänder på en mycket låg frekvens och stor våglängd. Radiovågornas magnetfält inducerar strömmar i befintliga elektriska ledare. Dessa strömmar ger upphov till ett sekundärt magnetfält vars reella och imaginära (fasförskjutna) vertikala komponenter uppmätes i mottagaren i procent av primärfältet.

Mottagaren är liten och handhas lätt av en person.

Metoden testades i Lummelunda i mars 1980 i samband med slingrammätningar. Resultaten var dock helt negativa trots att instrumentet provades över kända subterrana vattendrag och över anomalier som påvisades med slingram. I en rapport av Müllner & Eriksson (1979) redovisas emellertid goda resultat från ett försöksområde vid Enköping. En möjlig förklaring är att deras tester utförts i annan typ av berggrund där vattnet uppträder i breda sprickzoner, d v s de vattenförande zonerna kan ha haft större area än de smala vattenkanalerna i Lummelundakalken.

TV-kamera:

Mellan Lummelundagrottans mynning och slukhålen i övre delen av Kanalen ligger en fastighet tillhörig K.G.Källgren. Vid en brunnsborrning på 1930-talet passerade borren, på mellan 18 och 24 m djup, en vatten- och luftfylld hålighet i berggrunden. 1962 påvisade Andersson & Gusting medelst radioaktiva spårämnen att vattnet i brunnen står i förbindelse med Lummelundaströmmen.

På initiativ av Lars Erik Åström genomförde medlemmar i Spel-eologförbundet 1974 en undersökning av det luftfyllda utrymmet i brunnen. Den enda öppningen till detta utrymme är brunns-hålet (89 mm diameter). Då uppgifterna om brunnsdjup, vattendjup m m var osäkra konstruerades en mätsond med tre mikrobrytare, som först sänktes ner i brunnen (se fig.40B). En av mikrobrytarna påverkades av en i bottnen utskjutande pinne, en annan påverkades av en flottör i rörets nedre del, medan den tredje var ansluten till ett känselspröt som stack ut några

cm på sondens sida. De hade till uppgift att signalera då sonden träffade på hålrummets botten respektive då en eventuell vattenyta påträffades och då borrhålet övergick i den större håligheten. Mikroströmbrytarna tände via en kabel i nedsänk- ningsröret olika lampor på en kontrollpanel.

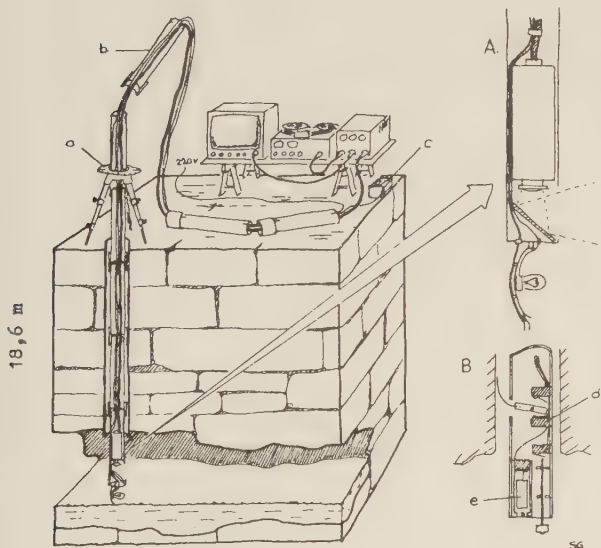


Fig.40 TV-utrustning för undersökning av grottan under brunnen D i fig.4.

a = stativ med grad- skiva

b = skarvrör av plast i 3 m längder,

c = mätare kopplad till känselkropp- arna under sond- erna A och B.

A = sond med TV-kamera, spegel i 45° och halogenlampa.

B = mätsond för bestämning av brunnsrörets längd, vattenyta och djup. Teckningen utförd av Sven Gunvall.

För själva undersökningen användes en cylindrisk TV-kamera (Grundig FA 30) med en diameter av 63 mm och en längd av 400 mm. Kameran monterades i ett skyddshölje av plaströr och under kameran monterades en spegel i 45° vinkel så att kameran kunde se horisontellt. Längst ner monterades en 650 W halogenlampa med reflektor. Under denna hängdes två oisolerade elkablar, när dessa nådde vattenytan slöts en krets varvid en lampa på kontrollbordet tändes, en säkerhetsåtgärd för att inte dränka kameran (se fig. 40A).

Hela anordningen sänktes ner i brunnsröret via centrumhålet i ett stativ som försetts med gradskiva (fig.40A). Kameran hölls uppe av ett 47 mm plaströr som skarvats ihop av tremeters- längder. Inne i röret gick kablar till en kamerakontrollenhet.

Kameran var också ansluten till en monitor, ett oscilloskop för inställning av kameran och en videobandspelare (fig.40). Utrustningen har beskrivits mera detaljerat av Åström (1975). Inspelningen på videobandspelaren gjordes under det att kameran vreds runt, riktingen utlästes på gradskivan och talades in på ljudspåret synkront med bilden. Vid varje tiotal grader hölls kameran stilla och höjdes 24 cm (så mycket det gick på låg takhöjd). Då inspelningen senare granskades gick det att på bildskärmen mäta hur mycket bildcentrum flyttade sig uppför grottväggen vilket ju var 24 cm i verkligheten. Då också kamerans brännvidd och dess "negativformat" var kända kunde avståndet till grottväggen beräknas. Genom att på detta vis gå igenom det inspelade bandet kunde man upprätta en plankarta över grottans synliga luftfyllda del. Kartan och övriga resultat finns redovisade i kapitel 9.

DYKNING

I samband med dykningar i helt vattenfyllda partier av grottan har vanlig sportdykarutrustning med lufttuber använts. För kommunikation mellan de av vattenlås avspärrade delarna av grottan utnyttjades portabla trådtelefoner. Av säkerhetsskäl användes livlinor och fasta rep som riggades upp genom sifonerna.

PUMPNING

Sommaren 1978 torrlades tillfälligt ett antal grottsjöar, som utgjorde vattenlås, för att tillåta vidare passage genom grottan. Härvid användes tre dränkbara pumpar på 600 - 1 000 l/min. Två av dessa samt åtskilliga rullar slang lånades välvilligt ut av Nymans Entreprenad i Visby.

Sommaren 1980 gjordes ett nytt försök i en annan del av grottan. Trots att fyra pumpar användes, med en sammanlagd kapacitet på 3 800 l/min, misslyckades försöket då vattenföringen ökade kontinuerligt på hög nederbörd.

FOTODOKUMENTATION

Under arbetets gång har det tagits några tusen fotografier varav de flesta under jord. Fotograferingen i grottan har skett under svåra omständigheter där fukten och lera utgör de största problemen. Den höga luftfuktigheten medför dessutom att utandningsluften bildar en lokal dimma kring fotografen.

De flesta bilderna har tagits av Mischa Gavrjusjov som specialiserat sig på grottfotografering. Då en del av tekniken ligger i efterbearbetningen har han framkallat och kopierat bilderna själv.

Trots att utrustningen förvaras i stöt och vattentäta lådor blir den oftast skadad av fukt och lera. Ett annat problem är att blixtaggregaten endast fungerar någon timma i den höga luftfuktigheten.

I huvudsak har vanliga spegelreflexkameror av småbilsformat använts. De är emellertid klart olämpliga i denna miljön. Mera lämpliga är kameror för undervattensbruk eller s k allväderskameror. Även blixtrrustningen bör vara vattenskyddad.

ÖVRIG UTRUSTNING

Den utrustning och de metoder som använts vid de klimatologiska, biologiska, sedimentologiska och bergmekaniska undersökningarna redogöres för i början av respektive kapitel.

SAMMANSTÄLLNING AV METODER FÖR DETEKTERING AV UNDERJORDISKA HÅLRUM

Slingram och VLF-metoderna har, såvitt jag vet, inte tidigare beskrivits i samband med grottdetektering men liknande och helt andra metoder har testats. Här nedan ges en litteratursammanställning över andra lämpliga metoder. Oftast utnyttjas dessa metoder för att spåra närliggande fenomen som vattenförande zoner, tektoniska zoner etc.

Det första försöket att spåra grottsystem från markytan utfördes av Joyce i Kentucky 1931 där han utnyttjade en metod som byggde på elektromagnetisk absorption. Det är dock först under 1970-talet som intresset vaknat på allvar.

Elektrisk resistivitet

Det elektriska motståndet i berggrunden mätes varvid anomalier av olika slag ger sig till känna.

Denna metod har använts vid flera tillfällen. 1975 gjorde Myers en utvärdering av dittills publicerade resultat. Hans slutsats var att metoden enbart var tillförlitlig när det gällde att påvisa gasfyllda tunnlar belägna bara några meter under markytan. Samma år lovprisar emellertid Krulc denna metod och gav exempel på hur han med hjälp av denna funnit en stor grotta i Kroatien, men han menar samtidigt att de geologiska metoderna är alltför litet testade i dylika sammanhang.

Manley & Garton (1977) beskriver hur de uppnått lyckade resultat med metoden i samband med vägbygge. De påvisade grottorna verifierades via borrhningar. Författarna anger metoden lämplig både för luft- och vattenförande grottor.

Seismik

Med hjälp av olika metoder skickas stötvågor ner i berggrunden. Stötvågornas hastighet genom och reflektion mot olika lager (diskordanser) registreras via speciella mikrofoner.

Av de tekniska hjälpmedlen förefaller seismiken att vara mest utprövad vid grottdetektering. En av de som arbetat med att utveckla metoden är Kirk. Han har i ett antal artiklar (se Kirk 1973) redogjort för metodens användbarhet och förordar den enkla hammarseismiken. Det är de reflekterande vågorna som bäst indikerar kaviteter.

Rechtien et.al. (1975) anger att de t o m har kunnat särskilja mellan luftfyllda och sedimentfyllda grottgångar.

Gravimetri

Gravitationen på en viss punkt av jordytan mäts med hög noggrannhet. Underliggande hålrum medför minskad tyngdkraft. Omnes (1975) beskriver hur han med en högkänslig gravimeter har spårat underjordiska tunnlar. Kirk (1975) har också testat metoden och funnit den användbar, men han anger att den enbart är tillämpbar ner till ett djup av tiotals meter. Frohlich & Smith (1977) har emellertid kartlagt karstföreteelser på cirka 100 djup med metoden. Då metoden är tidskrävande och resultaten inte helt entydiga (enligt författarna själva) får den anses som mindre tillämpbar i sådana här sammanhang.

Georadar

Strukturer under markytan registreras genom reflekterade radarvågor.

Sedan början av 1980 pågår ett projekt vid avdelningen för teknisk geologi, högskolan i Lund, där man testar en utrustning benämnd georadar. Denna "jordradar" har förmågan att tränga ner 30 - 40 m i torrt berg. Teoretiskt förefaller metoden mycket lämplig att spåra underjordiska hålrum, vi räknar med att eventuellt särskilja mellan vattenförande och icke vattenförande system. Förhoppningsvis kommer metoden att testas i speleosammanhang 1980 eller 1981.

Biofysiska metoden

Elektriska ledare under markytan ger upphov till ett elektromagnetiskt sekundärfält p g a jordmagnetismen. Metoden bygger på att människokroppen tjänar som sensor. Avsnittet ägnas mer utrymme än ovanstående då metoden är att anse som kontroversiell.

Den troligen mest utnyttjade metoden världen över, när det gäller att spåra underjordiska vattenförande hålrum är BPM (biophysical method). BPM är ett nytt namn på en uråldrig metod. Den nya beteckningen lanserades i Sovjetunionen i början av 1970-talet för att slippa ifrån de associationer med mysticismen som de rådande beteckningarna gav upphov till.

På engelska är den gängse benämningen dowsing. I Sverige kallar vi metoden för slagruteteknik eller rutgängeri. I vårt land betraktas rutgängeri inom geovetarkretsar med stor skepsis alltsedan professorerna Arrhenius, Högbom, Öhrvall, Ekström m fl (enligt Ekström 1934) i ett flertal artiklar kategoriskt avfärdat slagrutans användbarhet. Samma sak skedde i de flesta utvecklade länder i samband med det teknologiska genombrottet. Numera har emellertid vetenskapsmän i några av dessa länder accepterat BPM som ett reellt fenomen och åtskilliga uppsatser har publicerats om fenomenet och dess orsaker. I Sverige har dock intresset i vetenskapliga kretsar varit obefintligt. Men hösten 1979 visade prof. Ove Stephanson, Luleå, genom en artikel i Dagens Nyheter att det nu även i vårt land finns ett intresse för seriös forskning kring slagrutefenomenet. Stephanson beskriver bl a hur han här i Sverige genomfört ett s k blindexperiment där slagrutemannen (en rumänsk forskare) lokaliserade geologiska förkastningar med stor precision. Själv har jag i Mieskets karstområde i Tärnafjällen genomfört ett flertal blindtester med tre slagrutegångare. Av dessa hade två aldrig tidigare provat slagruta. Deras förmåga avslöjades tidigare samma dag då 32 personer från speleologförbundet testades, båda var starkt skeptiska och skrämde av sin förmåga. Testerna utfördes ovanför underjordiska vattendrag vars existens enbart var kända av mig. Rutgängarna kunde vid varje test korrekt markera de underjordiska kanalernas projektion i markytan. Vid ett tillfälle påstod alla tre, oberoende av varandra, att en underjordisk kanal delade upp sig i tre grenar. Detta förhållande kände jag ej till, men en kontroll visade att kanalen verkligen förgrenade sig under markytan. Avståndet mellan ytan och vattnet var i de aktuella fallen maximalt fyra meter. Senare försök ovanför Lummelundagrottan med en av rutgängarna gav negativa resultat, men här var avståndet cirka 23 m.

En spontan reaktion hos flera läsare är att jag nu överskrider gränsen för det vetenskapligt tillåtna och gått över till vidskeplighetens gränsområden. Jag tänker inte gå in på varför rutgängeri har hänförts till det övernaturliga eller klassats som ren bluff, men en bidragande faktor under det senaste "upplysta" århundradet var säkert att forskarna inte kunde förklara fenomenet.

Idag har man emellertid kommit så långt att detektering av vatten och mineraliseringar medelst den biofysiska metoden till stora delar verkar att kunna förklaras. "Svaga magnetfält kan bevisligen få slagrutan att röra sig i händerna på känsliga människor" säger Stephanson (1979) och hänvisar till den franske fysikern Rocards experiment 1968. Att utslag av slagrutor var kopplade till magnetiska anomalier påvisades emellertid redan av Wüst & Petsche 1936 (se Rocard 1964). Åtskilliga har sedan dess hävdat ett samband mellan de muskelsammandragningar som styr slagrutans rörelser och svaga magnetiska avvikelser (se Presti & Pettgrew 1980).

I en forskningsrapport, som rör djurens orienteringsförmåga (främst flyttfåglar och brevduvor), redogör Presti & Pettgrew för hur de (och andra) funnit fickor med magnetit i anslutning till vissa muskler. De tror att vad de funnit är högkänsliga biologiska magnetreceptorer. I slutet av artikeln säger de: "It has not escaped our notice that our proposed mechanism may be relevant to the claim that positive dowsing responses in humans are correlated with relatively small changes in the local magnetic field.---a magnetically sensitive muscle receptor could conceivably give rise to muscular movement sufficient to produce the classic dowsing responses".

Avslutningsvis vill jag nämna att enligt Williamson (1979) ligger Sovjet längst framme när det gäller forskning och tillämpning av BPM. Han refererar omfattande tester där BPM jämförts med konventionella metoder i vatten- och metallprospektering där BPM visat sig vara snabbare, billigare och ofta mer tillförlitlig. Men Williamson nämner också: "Despite its successes in the field, though, BMP is by no means accepted as a valid technique by all Soviet geologist".

I Watson (1976) ges en del exempel som visar att BPM tillämpas officiellt i stor utsträckning även i västvärlden. Han nämner bl a att de flesta större brunnsborrningsföretag i USA har anställda slagrutemän. På min förfrågan har det visat sig att flera mindre företag i Sverige också anlitar rutgångare, men ingen av de tillfrågade har velat figurera i tryck om att de gör det - vilket är betecknande för den status BPM fortfarande har i vårt land.

9. GÅNGSYSTEMETS UTBREDNING OCH MORFOLOGI

Avsikten med detta kapitel är att försöka ge en uppfattning om hur själva grottan ser ut, hur omfattande det kända gångsystemet är och hur omfattande hela systemet totalt kan tänkas vara. Hur och varför grottan har bildats och varför den ser ut som den gör diskuteras i kapitel 15.

De kända delarna av Lummelundagrottan består av två morfologiskt helt skilda gångsystem. Det första, benämnt Aktiva Systemet (A.S.), utgöres av den del av grottan som normalt är genomfluten av Lummelundaströmmen. På kartan, fig.41, är större vattenytor i grottan markerade med ett streckraster och där bäcken är smal markeras detta med pilar i strömningsriktningen. Vattenförande gångar benämnes inom speleologin aktiva, d v s gångarna håller fortfarande på att utformas av vattnet. Saknas vatten permanent i grottgångarna benämnes de fossila då ju ingen vidare utlösning av kalken kan ske där. De nordöstra delarna av grottans kända partier föreföll permanent torrlagda varför de fick arbetsnamnet Fossila Systemet (F.S.).

Aktiva Systemet består huvudsakligen av rymliga tunnlar där endast ett fåtal sidogångar finns till själva huvudgången. Fossila Systemet består däremot av små trånga gångar utbildade till ett labyrintartat system.

Till skillnad mot de flesta andra kända karstgrottor i Sverige är gångarna i Lummelundagrottan relativt horisontellt utbredda d v s lutningen på gångarna är liten och det förekommer inga utpräglade katarakter eller stup. Från de övre slukhålén i Kanalen till grottmynningen faller den nuvarande grundvattenytan cirka nio m, och det förefaller troligt att vattenytan i grottan sjunker med samma belopp (se sist i kapitel 5). En uppbyggnad, där grottan oberoende av berggrundens strukturer eller

sammansättning skär genom denna utefter ett horisontellt eller svagt lutande plan, visar på hur grottan bildats från början. Gångsystemet har troligen utbildats i anslutning till en tidigare högre belägen grundvattenyta (diskuteras i kapitel 15). Denna typ av grotta kallas för "watertable cave". Med detta bildningssätt som utgångspunkt går det att skissera den ungefärliga vertikala utbredningen av grottans ännu utforskade delar. Fig.79 visar ett schematiskt tvärsnitt av hela grottsystemet från slukhålen längst upp i Kanalen till mynningen.

Fig.41 är en karta över de delar av Lummelundagrottan som var utforskade fram till juli 1980. Den totala längden av alla uppmätta gångar var då 2 430 m och den uppskattade volymen cirka 7 000 m³. De på kartan markerade namnen är, i det yttre delarna av grottan, namn som tidigare utforskare använt sig av. I de fall ett och samma objekt har flera namn har det namn tagits upp som turistguiderna använder.

I de delar av grottan som ligger innanför visningsdelen var enbart ett fåtal platser namngivna när denna undersökning startade. Då det är mycket svårt att bedriva ett längre tids arbete med flera personer inblandade i en grotta utan fasta referenspunkter har vissa partier försetts med namn under arbetets gång. Namnen har i de flesta fall uppkommit spontant, och enligt internationell speleologisk tradition är namnen i första hand deskriptiva.

En grottkartas noggrannhet anges enligt särskilda normer. Hittills har en femgradig engelsk skala (BCRA) varit den mest använda, men 1978 utkom Internationella Speleolog Unionen (Fabre 1978) med en karteringsmanual där bl a en ny sjugradig skala presenterades. Enligt denna skala är den teodolitkarterade delen av Lummelundagrottan karterad i UIS-grad 7 (högsta noggrannhet). Övriga delar av grottan är karterade enligt UIS-grad 5 = precisionskompass och stålmåttband, där bäringarna är tagna med en grads noggrannhet och polygonpunkterna är inmätta med ett fel som understiger 5 cm.

På kartan förekommer ett antal streckade gångar, i teckenförklaringen markerade som ej undersökta gångar. De flesta av dessa är helt enkelt så trånga att de ej går att tränga in i, medan några spärras av droppstensformationer som vi ej velat förstöra och andra åter blockeras av sediment.



Den här publicerade kartan (fig.41) är i en skala som ej tillåter detaljerad framställning. För framtida forskning kommer därför en originalkarta i skala 1:500 att vara tillgänglig, för om 1981 kommer den att finnas deponerad hos Sveriges Speleolog-Förbund, Box 4547, 102 65 Stockholm.

AKTIVA SYSTEMET

De kända delarna av A.S. utgöres av en huvudgång som förgrenar sig. I gångarna rinner Lummelundaströmmen fram som bäckar eller som mindre sjösystem med djup upp till 5 m. Endast ett fåtal sidogångar är kända till huvudtunnlarna, ytterligare gångar kan dock finnas under vatten.

Gångarna har för det mesta en tvärsnittsyta på över 3 m² även om detta ej alltid framgår av kartan. Mellan Bergakungens sal och Kanalerna visar kartan tyvärr bara en trång passage medan det i själva verket här finns stora förbindelsegångar. Dessa är dock belägna helt under vatten och har ej kunnat karteras. Samma gäller den trånga passagen vid Lerhamnen. Övriga delar av A.S. har annars en gångbredd på 2 - 5 m och en takhöjd på 1 - 4 m (till detta kommer bassängernas djup).

I grottans yttre delar fram till Sal 8 är gångarna mycket oregelbundna till formen med ojämna väggar och tak. Nedrasade partier förekommer här dessutom på flera ställen. Samma sak gäller för cirka 50 m av gången efter Sifon B. Detta beror på berggrunden som där består av massformig krinoidkalksten (se vidare kapitel 10). En viss uppfattning om grottgångarnas form kan fås genom de i fig.41 inlagda tvärprofilerna och genom längdprofilen i fig.42 (krinoidkalk fram till avståndet 200 m). Bilderna 19 och 20 visar typiska gångavsnitt i den massformiga kalken.

Efter Sal 8 skär grottan genom lagrad kalksten och gångarna blir mera regelbundna i formen och enhetligare i storlek. Detta framgår bäst av profilerna i fig.41. Längdsnittet, fig.42, från 200 m och inåt avspeglar inte så tydligt regelbundenheten då den i förhållande till längdskalan överförstorade höjdskalan ger en illusion av att gången ständigt skiftar i höjd. I själva verket är gången på långa sträckor utformad som en



Bild 19. Grottans fortsättning mot söder från Sal 6. Den till formen oregelbundna gången är utbildad i krinoidkalk. De mera olösliga delarna av kalken sticker ut som skivor i gången. Foto Mischa Gavrjusjov.



Bild 20. Kapellet i grottans visningsdel. Denna stora sal med mycket oregelbundna former är starkt präglad av instörtningar beroende på att berggrunden här utgöres av krinoidkalk. På en underdimensionerad dränering rinner vattnet fram över det gjutna golvet vid en vattenförling över ca 40 l/s. Foto Mischa Gavrjusjov.

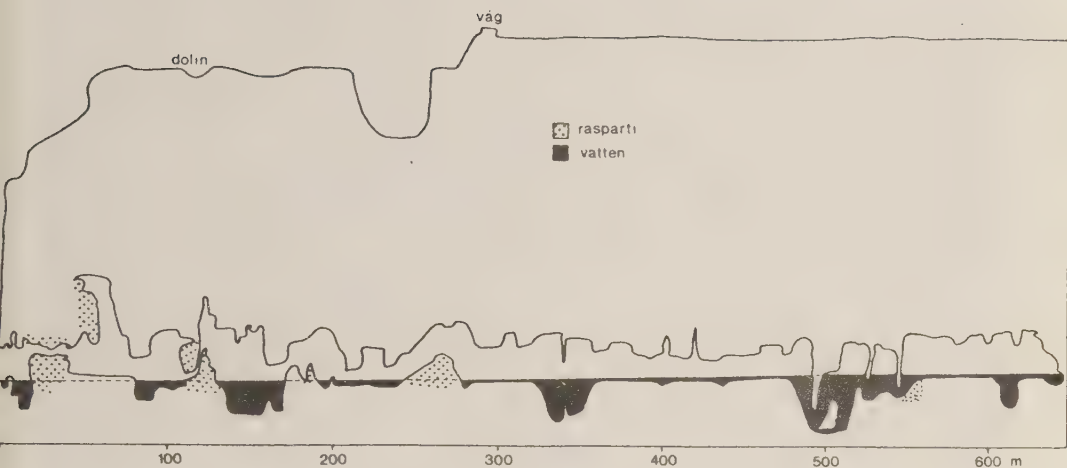


Fig. 42 Tvärprofil av Lummelundagrottans sträckning mellan mynningen och Sifon 4.

tunnel (främst mellan Torget och Sandbanken samt mellan Hästryggssjön och Sifon 1). Bild 21 visar det gångavsnitt som kallas för Tunneln. Salarna (vidgade gångar) i denna del av grottan har platt eller valvformat tak medan salarna i den massformiga kalken har oregelbundna former som bild 20 visar. De största avvikelserna från tunnelformen förekommer i samband med vattenbassängerna och sifonerna. Sifon är det samma som vattenlås d v s en fortsättande gång blockerad genom att taket går ner under vattnet. De sex markerade sifonerna fungerar som permanenta vattenlås men vid extremt hög vattenföring bildar även Lerhamnen, ingången till F.S. och en passage däremellan sifoner.

Sifonerna utgör förträngningar i både vertikal- och horisontal- led medan bassängerna i anslutning till sifonerna oftast utgör vertikala utvidgningar. Detta framgår av fig. 42 där Lerhamnen ligger på avståndet 175 m, Sifon 1 på 500 m och nr 3 och 4 strax därefter. På avståndet 340 m finns en annan förträngning som delar Hästryggssjön i två bäcken. Detta är troligen en tidigare sifon. Fig. 43 är en skiss av detta parti där A markerar det tidigare vattenlåsets läge. Detta bildar nu en trång port av en typ som vanligen kallas för grottfönster (cave window), se bild 22. Fotot är taget från C mot B i fig. 43.

I Hästryggssjön förenas Lummelundaströmmens huvudfåra med ett



Bild 21. Där de vattenförande delarna av grottan skär igenom lagrad kalk är gångarna mestadels tunnelformade. Bilden tagen från Vattenfallet (gången till vänster) mot Tunneln. Vattenföringen är ca 10 l/s. Foto Mischa Gavrjusjov.



Bild 22. Under detta "grottfönster" finns en tidigare sifon vars funktion som vattenlås upphörde när vattnet bröt genom ovanförliggande vägg. Foto Mischa Gavrjusjov.

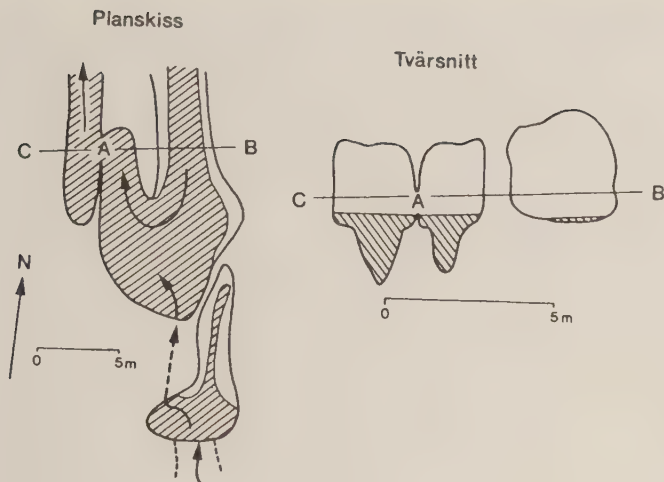


Fig.43 Bassängerna vid partiet Hästryggs-sjön. Här förenar sig Lummelundaströmmen efter att ha varit uppdelad, pilarna markerar strömningsriktningen.

biflöde som kommer från söder (markerat i skissen). Denna vattenström påvisades först i mars 1980 vid dykningar i den längst i söder belägna bassängen. Vid förnyade dykningar i juni 1980 avslöjades där en sifon. Bortom denna kartlades en gång på 101 m längd. De första 54 m har en utpräglad tunnelform med samma dimensioner som övriga delar av A.S. Resterande 47 m är utbildade i krinoidkalk och gångformen är oregelbunden, främst beroende på omfattande ras från väggar och tak. Längst in spärras framkomsten av en ny sifon (Sifon B) som ännu ej forcerats. Från Sifon B mot Sifon A rinner en mindre gren av den underjordiska Lummelundaströmmen fram.

Figurerna 44, 45 och 46 är detaljkartor över tre partier av A.S.

Fig.44 är en karta över de partier som upptäcktes i juli 1978 då sifonerna 1-3 torrlades med hjälp av pumpar. Kartan visar gången efter torrläggningen medan fig.41 visar hur vattnet normalt breder ut sig i systemet. I fig.44 är sifonerna avbildade i längdsnitt med normalvattenytan inlagd. Kartan publiceras då systemet ej går att besöka utan omfattande åtgärder.

Fig.45 visar grottan från mynningen in till Bergakungens sal. Lägg märke till hur olika denna del av grottan är uppbyggd till skillnad mot den enkla tunnelsträckningen i fig.44. Detaljkartan motiveras av att partiet är så komplicerat uppbyggt att detaljerna går förlorade i fig.41. Dessutom kan det vara av

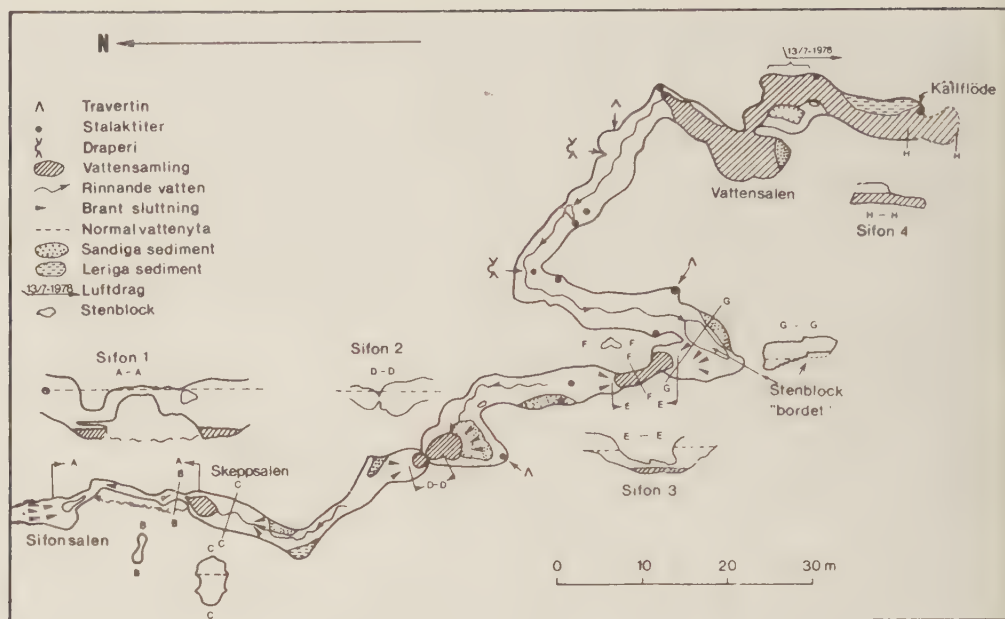


Fig.44 Det 1978 nyupptäckta partiet av grottan beläget mellan Sifon 1 och Sifon 4. Tvärprofiler av sifonerna inlagda i fig., streckad linje markerar vattenytans normala läge. Karterad i UIS-grad 5.

intresse att jämföra denna kartbild av grottmynningen med tidigare framställningar. Längdprofilen A-F, nederst i fig.45, är generaliserad, i verkligheten är gången betydligt mera oregelbunden. Mellan Kanalerna och de söder om dessa liggande vattenytorna i Bergakungens sal finns vattenfyllda förbindelser. Profilen A-A visar att Pojkarnas gång är en hög och smal snedställd spricka som utvidgar sig i basen så mycket att det är möjligt att forcera gången i ålande ställning. Mynnningen till denna gång var dold fram till 1954 vilket hindrade tidigare utforskare från att komma vidare in i grottan.

Fig.46 är en dokumentation av hur det såg ut i sal 5 och 6 samt mellanliggande parti före utbyggnaden av visningsdelen 1978-79. Nu har allt rasmaterial av mindre format avlägsnats från salarna och delar av mellanliggande parti har sprängts bort. Från centrum av det i figuren markerade X har två foton tagits av den från taket nedstörtande blockansamlingen som tidigare fyllde upp Sal 6. Bild 23 är exponerad rakt norrut och bild 24, 25⁰ åt väster. Ett omfattande bildmaterial från de båda salarna



Bild 23. Dokumentation av rasmassorna i Sal 6 före utbyggnaden. Bilden tagen från X i fig.46 mot N. Foto Mischa Gavrusjov.



Bild 24. Dokumentation av rasmassorna i Sal 6 före utbyggnaden. Bilden tagen från X i fig.46 mot N25°W. Foto Mischa Gavrusjov.

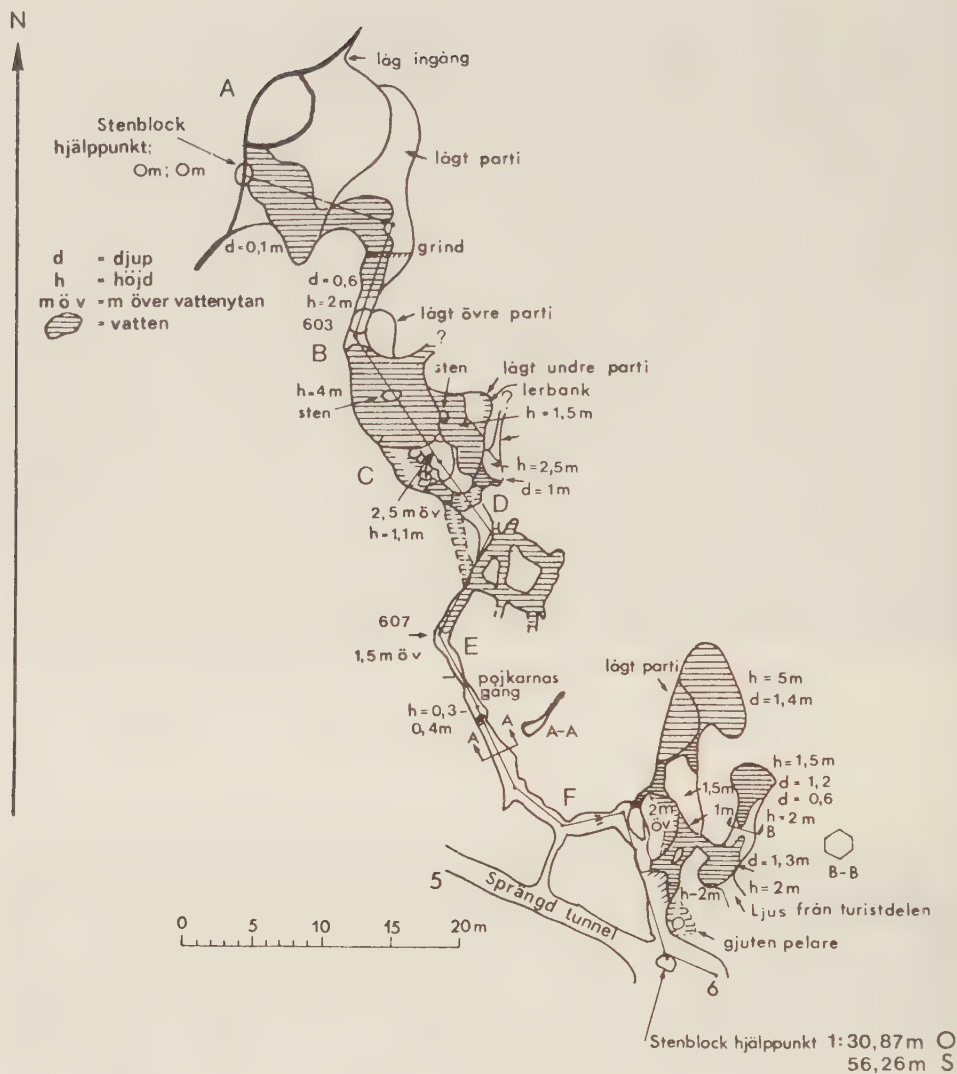


Fig. 45 Partiet mellan Lummelundagrottans mynning och den del som är öppen för turistvisning (Bergakungens sal). Längst ner en tvärprofil av samma sträcka. Karterad i UIS-grad 5.

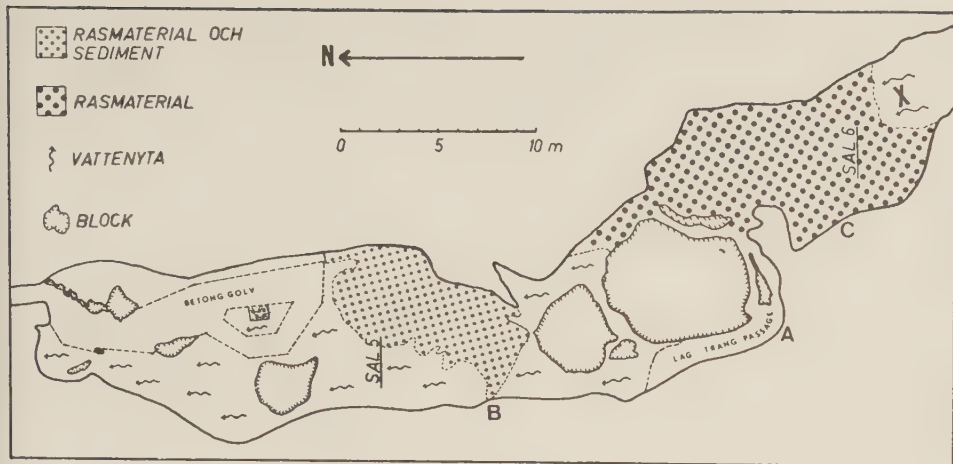


Fig.46 Sal 5 och Sal 6 före utbyggnaden 1978-79. Den nya tunneln mynnar mellan C och X.

finns deponerat hos Sveriges Speleolog-Förbund. Partiet mellan Sal 5 och 6 är präglat av kollapser i stor skala, de gigantiska måtten på blocken framgår i fig.46. Tre olika ^{14}C dateringar från avlagringar i grottan indikerar att detta stora ras ägde rum för cirka 3 600 år sedan och att vattenpassagen då täpptes igen ganska rejält (dateringen diskuteras i kapitel 12 och 15). Partiet var ända fram till utbyggnaden ett hinder för vattnet. Vattenståndsmätare visade att högvattnet vintern 1977-78 hade stigit ända upp till 1,6 m över lågvattenståndet innanför ras-massorna i Sal 6 medan vattenytan i Sal 5 endast hade stigit 0,7 m.

I den lagrade kalken innanför Sal 8 har det skett relativt få ras. Det är bara i de båda parallella gångarna, som går norrut från Torget, som större instörtningar har ägt rum. Hela den torrlagda gången rymmer nedfallna block överlagrade med fin-korniga sediment. Bild 43 visar hur ett sjok av taket har släppt, fotot är taget cirka 15 m norr om pelaren i Torget. Raspartiet framgår också i fig.42 på avståndet 250 m (profilen är dragen i den torrlagda gången då den vattenförande delvis är oframkomlig).

Torget är benämningen på en sal där flera gångar löper samman. Taket når här en höjd av 4 m och mitt i salen finns en pelare av fast berg. I södra kanten av pelaren mynnar det borrhål

från ytan, som markerats med H i fig.4.

Aktiva Systemet saknar nästan helt formelement som flytfacetter och korrosionskolkar. Av de senare finns dock ett fåtal i Tunnelns tak och sidor.

FOSSILA SYSTEMET

Gångarna i detta system ligger 1 - 3 m över vattenytan i Aktiva Systemet, men det är högst troligt att de båda systemen har utformats i samma nivå. Dels bör de större gångarna i A.S. ha eroderat sig något längre ner i berggrunden och dels är de flesta gångarna i F.S. nu mer eller mindre fyllda med rasmaterial och sediment. I kapitel 15 förklaras dessutom hur vissa gångar "förflyttar sig uppåt" efterhand som bitar av taket faller ner.

Endast tre platser i systemet når ner till samma nivå som vattenytan i Sal 8 nämligen Brevlådan, Gyttjebadet och Inre sjön.

I fig.41 finns inga gångprofiler från F.S. inlagda. Dels skulle de ha blivit mycket små om samma skala använts som för övriga profiler, dels är profilerna i F.S. sekundära d v s de säger inget om gångarnas ursprungliga form eller genes då profilerna till stor del är präglade av ras och sedimentfyllnad. Hur gångarna kan se ut framgår av bilderna, 32, 42 och 44. Passagerna överstiger sällan 2 m bredd och höjden är sådan att förflyttningar mestadels sker krypande eller ålande. Det är i princip enbart de NV-SO orienterade gångarna, t ex Droppstensgalleriet, Heliktitgången och Promenadgången, som är något högre i tak. Enligt Sweeting (1975) är det vanligt att permeabiliteten är bättre utbildad utefter vissa sprickriktningar med t ex större grottgångar som följd.

Endast en, till synes permanent vattensamling har påträffats i F.S., det är den s k Inre Sjön. Vattnet kan också förekomma vid Gyttjebadet och i Brevlådan men där sjunker det relativt snabbt undan, vattnet uppträder i samband med snösmältning eller riklig nederbörd. Vid högvatten i Kanalen rinner det fram en vattenström vid Hammarkorset, systemet är alltså inte fossilt i alla delar utan vissa gångar tycks vara intermittent vattenförande. Detta förhållande tas upp i nästa avsnitt under rubriken Hydrologiska förhållanden.

Hela F.S. präglas av gångar som till synes slutar blint. Flera av dessa "blinda" gångar har dock en fortsättning som antingen är för trång att utforska eller är tilltäppt av ras eller sediment. I de fall en tydlig fortsättning kan skönjas har detta markerats på kartan med streckade linjer. Det är troligt att de blinda gångarna knyter an till andra gångar så att den labyrintartade uppbyggnad systemet uppvisar i själva verket är ännu mera labyrintartad. Som ett exempel kan HB-gången nämnas. Gången är utforskad till en längd av cirka 50 m. Därefter hindras vidare framkomst genom att den fria passagen mellan taket och de sandiga sedimenten blir alltför trång. Vid Pot Point finns en gång, med riktning mot HB-gången, som är helt tilltäppt av samma slags sediment som HB-gången. Det är alltså troligt att det rör sig om samma gång. Denna speciella typ av gångsystem (network caves eller maze caves) har varit föremål för åtskilliga undersökningar. Publicerade resultat visar att utbildningen är strikt kontrollerad av sprickor i berggrunden och att gångarna till största delen bildar slutna slingor (se t ex Palmer 1975 och Ryder 1975).

Den ovan omnämnda salen Pot Point är liksom Torget utbildad kring en central pelare av fast berg. Denna sal utgör tillsammans med Sandsalen de två högsta punkterna i den del av systemet som ligger innanför Droppstensgalleriet. I händelse av att folk skulle bli innestängda i denna del av grottan vid snabbt stigande vatten (påskan 1978 visade det sig att vattnet kan stiga snabbt) är det dessa två ställen som får tjäna som tillflyktsorter.

Förutom att F.S. markant skiljer sig från den aktiva delen av grottan genom de mindre och labyrintartade gångarna, frånvaron av vatten och genom rikliga förekomster av lösa avlagringar är det också i F.S. som de flesta kalcitutfällningarna förekommer. I varje gångavsnitt finns det någon form av speleothems och i vissa gångar är tak och väggar nästan helt täckta av kalkutfällningar, detta behandlas i kapitel 11. Även lösningsfickor, s k korrosionskolkar, förekommer rikligare här än i A.S. Fickorna är relativt stora och de uppträder både i tak och på väggar, i gångarna Valet och Kvalet finns ett antal som är av sådan storlek att de syns som utbuktningar på plankartan fig. 41 (hur kolkarna uppkommer behandlas i kapitel 15).

HYDROLOGISKA FÖRHÅLLANDEN SAMT DE ÄNNU UTFORSKADE DELARNA AV GROTTAN

I fig.48 har de kända och karterade delarna av grottan projicerats i markplanet. På kartan har också inlagts de anomalier i berggrunden som påvisats vid slingrammätningar i terrängen. Enbart kraftiga anomalier som tolkats som vattenförande kanaler har markerats med snedstreckade linjer på kartan. Observera att de förmodade vattenkanalernas sträckning är generaliserade då sidoavståndet mellan de enskilda mätprofilerna varierar mellan 20 och 150 m, mellan avläsningarna (mätpunkterna) inom profilerna är avståndet däremot 10 eller 20 m. De punkterade linjerna illustrerar kända samband mellan slukhål och grotta men där den verkliga sträckningen inte är känd.

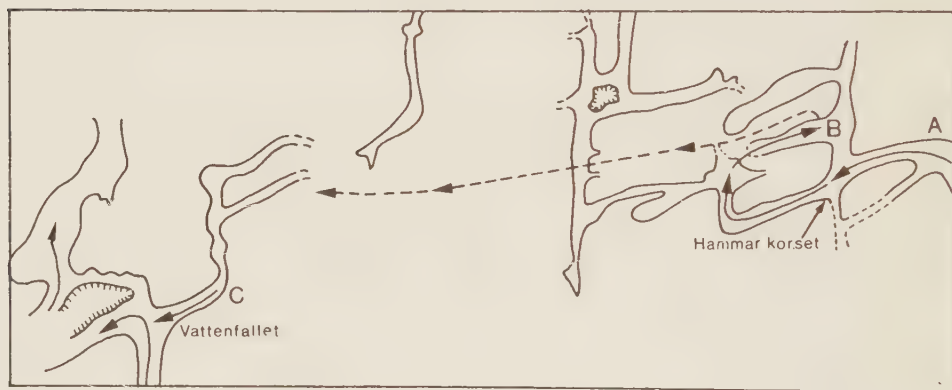


Fig.47 Detaljförstoring av fig.41 visar hur rinnande vatten från Fossila Systemet förenar sig med huvudströmmen vid Vattenfallet. Heldragna pilar visar var vattnet iakttagits, streckade markerar påvisad förbindelse.

Länge förmodade vi att Fossila Systemet gjorde skäl för sitt namn, d v s att rinnande vatten inte längre förekom i gångsystemet. Vid ett besök påsken 1976 fann jag dock att en mindre del av systemet var vattenförande. Fig.47 visar var strömmande vatten iakttagits. Strax norr om Hammarkorset bildas då en sifon (A) som förhindrar vidare utforskning om var vattnet kommer in i systemet. Nedströms söker sig vattnet ner i ett trångt

underliggande gångsystem vid B. Vattnet visar sig sedan i gången vid C där det via ett 40 cm högt vattenfall förenar sig med huvudströmmen. Senare observationer har visat att det är när vattnet i Kanalen når fram till slukhålsområde B som vattnet rinner fram i F.S.

I fig.48 symboliserar punktlinjen från B den påvisade förbindelsen mellan slukhålen och F.S. Eventuellt står F.S. även i förbindelse med de mindre sluk som är belägna mellan slukhålsområdena A och B. Grottans intermittenta del (den del som är vattenförande enbart vid högvatten) bör alltså sträcka sig ända fram till Kanalen. Luftströmningen i Klafvers spricka (E i fig.48) indikerar också att grottsystemet fortsätter bortom de utforskade partierna. Det är möjligt att detta fortsättande gångsystem kommer att påträffas vid vidare utforskning via Hammarkorset där sediment för närvarande hindrar tillträdet till en fortsättande gång. En annan möjlighet är via Inre sjön som troligtvis utgör en sifon.

Till Aktiva Systemet kommer vattnet huvudsakligen via Sifon 4. Exakt var sifonen är belägen har inte kunnat fastställas trots upprepade dykningar. Vattnet grumlas nämligen mycket snabbt varvid sikten helt försvinner. Men vatten rinner i vart fall från detta parti och vidare in i systemet. I samband med läns-pumpningen 1978 pumpades även vatten ur Hästryggssjön för att hålla flödet ut ur grottan på en jämn nivå när de inre sifonerna återfylldes med vatten. Då framgick det att vatten strömmade in i huvudgången från sjöns södra ände. Senare dykningar visade att det där finns en sifon med fortsättande tunnel bortom. Slingrammätningar i terrängen indikerar att denna vattenström står i förbindelse med den grotta som finns under den borrhade brunnen vid D i fig.48. Figuren visar hur grottans förlängning åt norr och söder har kunnat bestämmas med slingram. Följande fakta talar också för att vattenströmmen under brunnen står i förbindelse med Sifon B: Grottan under brunnen (borrad genom 18 m berg) har karterats med hjälp av en nedsänkt TV-kamera. Hålrummet som karterats är av ansevärda dimensioner med ett vattendjup på minst 5 m och en takhöjd på cirka 2 m (siffrorna är ungefärliga då borrhålet mynnar i kanten av grottgången). Fig.49 visar kartan över grottan under brunnen, pilarna indikerar strömningen på ytvattnet vilken var möjlig att



Fig.48 Lummelundagrottans kända delar projicerade i markplanet.

M = Lummelundagrottans mynning

D = brunn under vilket grottan påvisats

A, B och C = slukhålsområden

Breda strecklinjer = slingrampåvisade anomalier

Punkterade linjer = förbindelser genom strömmande vatten.

iakttaga tack vare en riklig skumbildning. Förekomsten av skum indikerar att vattnet rinner fritt in i grottan, skum bildas nämligen i Lummelundagrottan när vattnet rinner fram som en bäck och skummet kan inte passera ett vattenlås. Vattnet tycks däremot inte rinna fritt ut ur grottsalen, skumvirvlarna i norra delen tyder snarare på att det där finns ett vattenlås. Avvägningar visar att vattenytorna här och i Hästryggssjön ligger på ungefär samma nivå, cirka 23 m ö h.

Andersson & Gusting (1962) visade genom sina spårförsök med isotopmärkt vatten att brunnen stod i kontakt med sluken vid C. En intressant detalj i deras undersökning är att mätinstru-

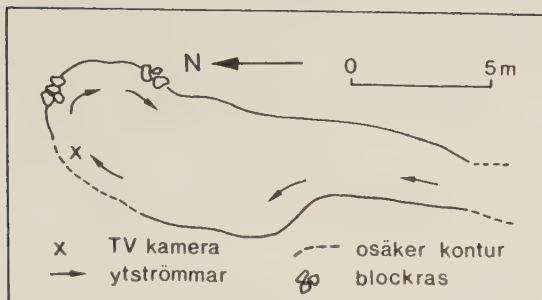


Fig. 49 Kartskiss
över hålrummet under
brunnen D (fig. 4, 48).
Skissen gjord efter
videoupptagning med-
elst TV-kamera som
sänkts ner i brunnen.

mentet i Lummelundagrottans mynning registrerade två tidsförskjutna pulser av radioaktivt vatten. Andersson & Gusting tolkade detta som att vattnet någonstans i underjorden förgrenade sig i två kanaler vilka nedströms återförenades. Det vatten som försvinner i det stora sluket vid C (C:3 i fig.13), där den radioaktiva lösningen injicerades, rinner senare fram i grottans huvudströmfåra via Sifon 4. Tydligt förses även brunnen med vatten från detta slukhål och vattnet rinner bevisligen vidare från brunnen norrut till Sifon B. Mellan Sifonerna B och A rinner vattnet fram på samma sätt som i A.S. huvudtunnel. Lummelundaströmmen förgrenar sig alltså under jord som Andersson & Gusting förmodade. Troligen finns åtskilliga andra förgreningar då allt vatten som försvinner ner i och mellan slukhålsområde C och B rinner ut genom Lummelundagrottans mynning. De två grenar av strömmen som påvisats under jord härstammar från samma slukhål, C:3 (det enda aktiva sluket vid upptäckten i juni 1980). Detta förhållande har illustrerats med punktlinjer i fig.48 där själva förgreningens läge har markerats på grundval av en relativt svag slingrampåvisad anomali. Det är alltså ovisst om vattenströmmen delar på sig just där. Frågetecknen i fig. 48 visar var mätningar har utförts utan att någon fortsättning av de förmodade underjordiska kanalerna har kunnat påvisas. Kartan visar emellertid att det utöver Lummelundagrottans förmodade fortsättning finns ytterligare fyra distinkta anomalier med en i stort sett E - W orientering (ytterligare två anomalier med samma riktning har påvisats omedelbart söder om den sydligast markerade. Vid Kanalen har fyra anomalilinjier påträffats och samtliga fyra leder rakt på slukhål i Kanalen (den östligaste anomalien anknuter till de igentäppta sluken vid bron, se fig.20). Något

märkligt är att dessa anomalier har en SW-NE riktning medan anomalierna längre söderut har en nästan E-W riktning. Tyvärr har det ännu inte varit möjligt att utföra mätningar i det mellanliggande området beroende bl a på ett orensat kalhygge. Mätningar har heller inte kunnat utföras mellan slukhålsområde B och Fossila Systemet varför sträckningen av förbindelsen/förbindelserna däremellan ännu är okända.

P g a störningar från staket och andra metallföremål i terrängen har inte heller fortsättningen från Sifon 4 kunnat detekteras.

Sammanfattningen av de slingrampåvisade anomalierna, redovisade i fig.48, är att de som utgår från Kanalen med stor sannolikhet verkligen är vattenförande hålrum. Detta påstående styrkes av att flödesmätningar vid de berörda slukhålen och grottans utlopp visar att samma mängd vatten som rinner ner i sluken rinner ut genom grottan (se kapitel 5). Detta innebär att Lummelundagrottan i sina övre delar förefaller att vara tämligen komplex med ett dendritiskt dräneringsmönster d v s flera tilllopp förenar sig till en huvudfåra. Av de längre söderut registrerade anomalierna är det enbart en som har påvisats vara en vattenförande grottgång. Men jag finner det troligt att även de andra anomalierna indikerar vattenförande hålrum. Vid G i fig.48 finns ett borrhål som på mellan 21,7 och 23,1 m h ö h går genom ett vattenfyllt hålrum. Det är alltså inte otroligt att det i berggrunden kan förekomma åtskilliga mer eller mindre vattenfyllda grottor. Det finns dock inget som säger att de måste stå i förbindelse med och dräneras via Lummelundagrottans gångsystem. Enligt det inledande resonemanget i kapitel 15 kan de mycket väl vara av typen slutna grottor utan förbindelse med vare sig sluk eller källor.

Vid behov av större grundvattenuttag i kalkberggrund kan det vara av värde att företa geofysisk prospektering med t ex slingram för att leta rätt på denna typ av grottor då de bör kunna ge större mängder vatten än ett vanligt borrhål.

Vad det gäller de anomalier som var väntade men som inte påträffades (fortsättningar på de påvisade gångarna) är det tänkbart att vattnet där rann fram som en alltför smal bäck eller att gångarna gick i mindre än 45° vinkel mot mätprofilen - i båda fall minskas möjligheten att spåra gångarna med slingrammetoden.

De utforskade delarna av grottsystemet är förmodligen utbildade kring samma svagt lutande plan som de kända delarna av grottan (se kapitel 5 och 15). Detta innebär att slukhålén utgör vertikala schakt med en fallhöjd på cirka 5 m.

Grottsystemet sträcker sig förmodligen inte långt bortom slukhålén då denna typ av grottor är beroende av en grundvattenyta för att kunna bildas. Cirka 800 m öster om slukhålsområde C går gränsen för Martebo myrs tidigare utbredning, d v s den gräns där grundvattnet gick i dagen fram till dess att myren dikades ut. Detta framgår också klart av fig.23B som visar grundvattenytans vertikala utbredning i området.

10. BERGGRUNDSFAKTORERNAS BETYDELSE FÖR GROTTSYSTEMETS UPPBYGGNAD

Berggrundens egenskaper har av tradition behandlats ingående i uppsatser om karstgrottor. Detta intresse har berott på sambanden mellan berggrundens egenskaper och grottornas utsträckning och former inte varit tillfredsställande klarlagda. Numera har dock avsevärd kunskap vunnits om dessa förhållanden, varför jag övervägt att låta detta kapitel ingå i kapitlet "Grottsystemets uppkomst och utveckling". Jag har dock valt att följa traditionen, även om jag anser att berggrundsredovisning numera inte behöver ta lika stort område i anspråk som tidigare.

Det förekommer i litteraturen flera olika sätt att uttrycka berggrundens betydelse för grottbildningar. Sweeting (1972) anger t ex i sitt sammanfattande verk följande berggrunds-faktorer som väsentliga:

1. De primära kapillärernas form
2. Kalkens petrologiska och kemiska karaktär
3. Berggrundens struktur (stupning, strykning, förkastningar
m m)

Hon anger dock ingen prioritetsordning, men genom att sammanställa åsikterna i publikationen "Symposium on the origin and development of caves" (publikation: se Ford 1971) och i följande handböcker: Jennings 1971, Bögli 1978, Moore & Sullivan 1978, Ford & Cullingford 1976 samt från omfattande undersökningar av berggrundens betydelse (Ryder 1975, Palmer 1975, Dreiss 1974, kan följande rangordning uppställas som en hypotes:

1. Sprickor
2. Skiktfogar
3. Förkastningar, strykning och stupning
4. Bergartens porositet
5. Bergartens sammansättning

Rangordningen är dock diskutabel. Rangordningen kan t ex vara påverkad av att de flesta studerade grottorna varit belägna i lagrad kalksten. Därtill finns det helt andra sätt att rangordna beroende på ur vilken synpunkt man diskuterar. Så framkom det t ex vid en diskussion vid det ovan nämnda symposiet (Ford 1971) att frekvensen av grottor kan vara mycket högre i revkalk än i lagrad kalk när de uppträder i samma region. Enligt detta sätt att se är alltså porositeten eller petrologin av avgörande betydelse för var grottor kommer att utbildas.

Ovanstående behandlar enbart berggrundens betydelse för grottbildningen. Andra viktiga faktorer är t ex klimatet och hydrologiska förhållanden.

PETROLOGIN

Lummelundagrottan förmodas, som tidigare nämnts, vara mer eller mindre horisontellt utbildad utefter en grundvattenyta. Berggrunden kan därför enbart ha ett begränsat inflytande på grottans utbildning i vertikalled, medan däremot dess horisontella utbredning och utformning i stor omfattning bestäms av berggrundsfaktorer.

Fig.51 är ett schematiskt tvärsnitt genom berggrunden, från havet över grottmynnningen upp till det översta slukhålet i Kanalen. De olika lagren stupar svagt åt SO. Grottan är för närvarande enbart utforskad till i höjd med S_1 (markerar det fossila sluket E i fig.4), men enligt tidigare resonemang bör det

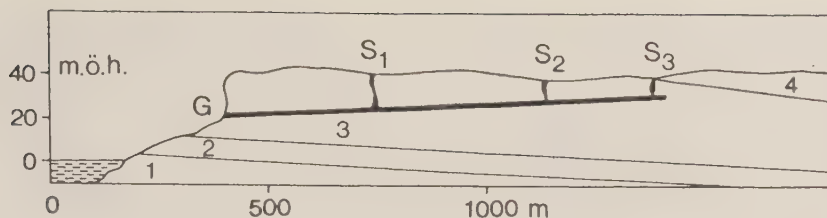


Fig. 51 Vertikalsnitt av berggrunden från havet upp till Martebo myr. Figuren visar hur Lummelundagrottan skär genom Höglintseriens kalkstenar, utbredningen av sträckan mellan S_1 och S_3 är dock hypotetisk då den ännu ej är utforskad. 1 = Undre Visby märgel, 2 = Övre Visby märgel, 4 = Toftakalksten, S = Slukhål.

fortsättande grottsystemet sträcka sig fram till de bortre sluken vid S_3 . Som fig. 51 visar är hela grottsystemet troligen utbildat i höglintgruppens kalkstenar, men denna vertikalt begränsade utbredning har förmodligen inte med petrologin att göra utan med den tidigare grundvattenytans läge. Nu skär inte grottan genom ett homogent kalkstenslager då höglintkalkstenen i sin tur indelas i fyra underfacies, A-D nedifrån räknat (Lindén & Odell 1978). De kända delarna av grottan är i huvudsak utbildade i den undre delen d v s Höglint A som består av:

1. Underst en biohermal olagrad kalksten (revkalk), delvis grovkristallin.
2. Märgelhaltiga, lösa och tämligen tjockbankade lagrade kalkstenar. Dessa innehåller en hel del fossil, främst då koraller, bryozoa, brachiopoder, snäckor och musslor.
3. Överst en delvis grovkristallin och delvis märgelhaltig krinoidkalk (uppbyggd av krinoidéer = sjöililjor).

Den biohermala kalken kan uppträda med stor vertikal utbredning och då "slå igenom" övriga lager. Så är fallet vid grottmynningen och i den norra tunneln.

Fig. 52 visar vilka lager som grottgångarna skär igenom. De yttre delarna fram till Sal 8 går genom krinoidkalk (med undantag för revkalken i mynningen). I Sal 8 dyker den, under krinoidkalken liggande, lagrade kalken upp. Bild 25 är tagen mitt i Sal 8 mot söder och visar kontakten mellan de båda kalklagren. Det kan förefalla egendomligt att de inre och något högre upp belägna delarna av grottan är utbildad i en kalksten som underlagrar det skikt som de yttre delarna av grottan är utbildade i, särskilt



Bild 25. Norra delen av Sal 8 där grottans vattenförande delar helt ändrar karaktär. Jag pekar på gränsen mellan krinoidkalk (övre) och lagrad kalksten. Grottans fortsättning åt söder får från denna punkt mera regelbundna gångformer p g a den lagrade kalken.



Bild 26. Grottgång utbildad i lagrad kalk. Gången har en oval form med platt tak. Observera avsaknaden av vadös skulpturering, det rinnande vattnet tycks inte ha förändrat den freatiskt bildade gångens form. Bilden tagen från Torget mot Sandbanken. Foto Mischa Gavrjusjov.

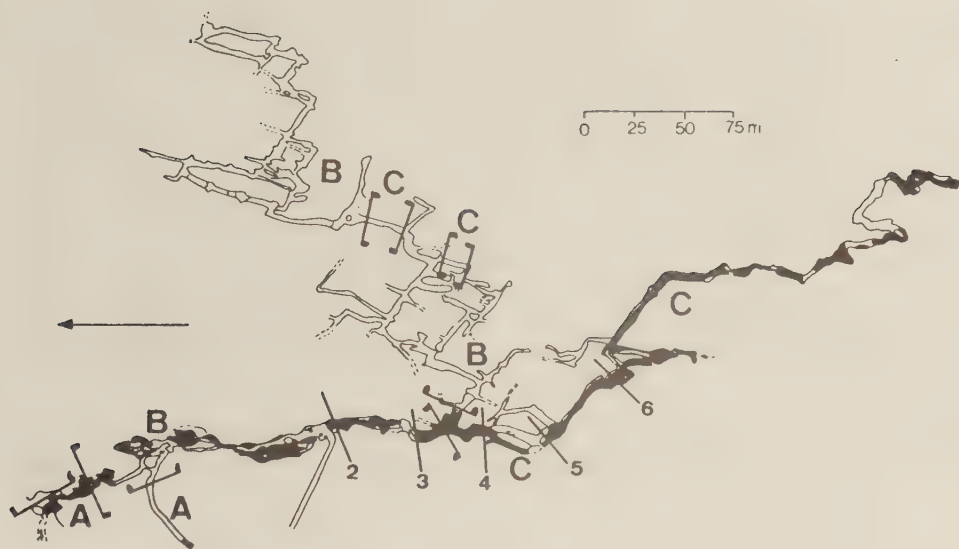


fig.52 Karta över Lummelundagrottan utvisande olika berggrundslager som denna skär genom. A = revkalk, B = krinoidkalk, C = lagrad kalk. Siffrorna visar läget på profilerna i fig.53.

med tanke på att lagren stupar åt SO. Orsaken är förmodligen att krinoidkalken avtar i mäktighet ju längre bort den förekommer från det tidigare revet (som förmodas ha legat vid klintkanten där revresterna uppträder). Krinoiderna levde nämligen oftast i direkt anslutning till biohermer (Lindén & Odell 1978). Även de kända delarna av Fossila Systemet är till stora delar utbildade i krinoidkalk, men på flera ställen tränger den lagrade kalken upp genom krinoidkalkstenen som fig.52 visar.

Fig.53 utvisar några vertikalsnitt av den blottlagda berggrunden i huvudgången, siffrorna relaterar till läget i fig.52. Den streckade linjen visar gränsen mellan krinoidkalken och den lagrade kalken i förhållande till gångens höjd. Mellan punkterna 3 och 4 förändras utseendet på grottgången markant. Bild 25 visar hur oregelbunden gångens profil är när den skär genom krinoidkalken medan bild 26, som är tagen mellan profilerna 5 och 6 mot 6, visar den jämna tunnelform som är typisk i den lagrade kalken. Nu förefaller det som om gångens form inte är det enda som förändras vid övergången. Jämför man huvudgångens sträckning åt båda håll från läget av profil 3 i fig.52, ser man

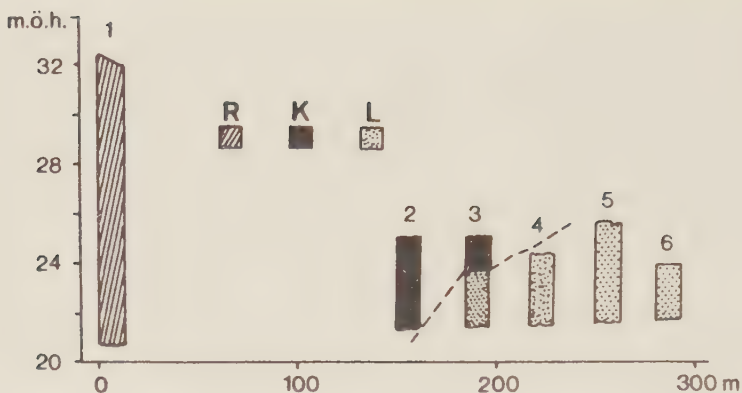


Fig. 53 Profiler av blottad berggrund i grottan från mynningen och ca 300 m in. Bokstäverna markerar rev, krinoid- resp. lagrad kalksten. Siffrorna hänvisar till läget i fig. 52.

att den nordliga sträckningen genom krinoidkalken är rakare än den sydligare som går genom den lagrade kalken. Orsaken till denna skillnad diskuteras nedan.

TEKTONIKEN

I inledningen till detta kapitel nämner jag att det främst är sprickorna i berggrunden som är avgörande för hur grottgångarna skall utbildas. En jämförelse mellan sprickriktningar och gångriktningar i Lummelundagrottan visar att denna inte utgör något undantag.

Fig. 54 utgöres av två st rosdiagram. Fig. 54b utvisar riktningen på 16 avsnitt av huvudgången medan fig. 54a visar riktningen på 24 sprickor som påträffats i huvudgången (främst i taket mellan Sifon 4 och Sal 8). Som figurerna visar är överensstämmelsen mellan gångarnas riktning och sprickornas mycket god. Samma kan utläsas i fig. 55, där a) illustrerar riktningen på 47 sprickor i Fossila S. och b) riktningen på 40 gångavsnitt där. Även mellan F.S. och A.S. finns en god överensstämmelse mellan sprickornas och gångarnas riktningar med undantag av riktningen $40-50^\circ$, det intervallet förekommer både som sprickor och gångar i A.S men ej i F.S.

För att undersöka om sprickriktningarna i Lummelundagrottan är

I nedanstående figurer är riktningarna angivna i % av antalet utförda mätningar. Materialet är indelat i 10^0 -klasser. n = antalet uppmätta objekt.

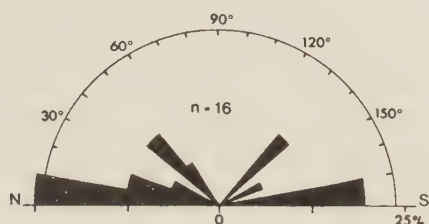
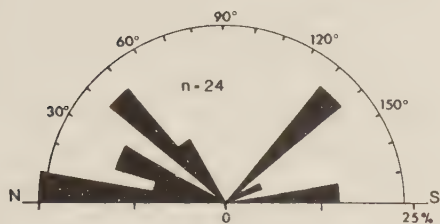


Fig. 54 Vänster = orienteringen av iakttagna spräckor i Aktiva Systemet.
Höger = orienteringen av gångarna i A.S.

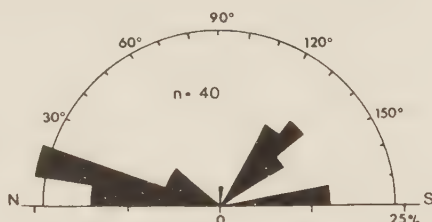
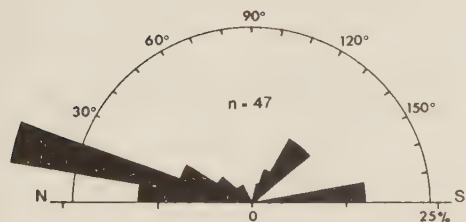


Fig. 55 Vänster = orienteringen av iakttagna spräckor i Fossila Systemet.
Höger = orienteringen av gångarna i F.S.

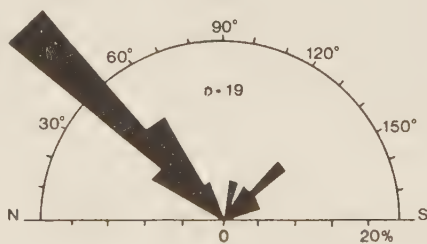
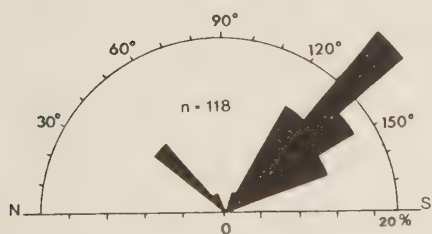


Fig. 56 Orienteringen av karstspräckor vid Lauks skjutbana.
Till vänster karstifierade spräckor och till höger kalcitläkta.

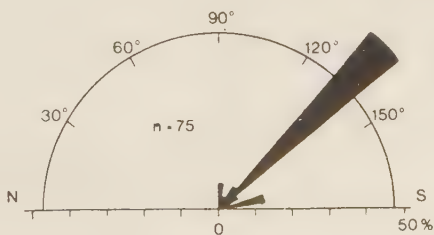
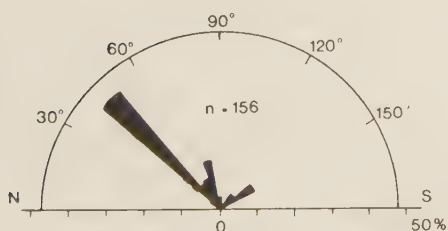


Fig. 57 Orienteringen av kartsspräckor 3 km E Visby.
Till vänster karstifierade spräckor och till höger kalcitläkta.

lokala företeelser eller ej genomförde jag riktningsanalyser av sprickor på två skilda lokaler på ön. Riktningarna i fig.56 är uppmätta på en sprickrik kalhäll vid övre delen av Lauks skjutbana, NV om Hejnum. Fig.56a visar riktningen på 118 sprickor som vidgats genom kemisk utlösning (som i bild 2) medan b) visar riktningen på 19 slutna sprickor. Den i fig.57 redovisade analysen avser ett område beläget 200-300 m söder om vägen mellan Österby och Endre i höjd med gårdarna vid Bäckes. Fig.57a visar riktningen på 156 karstifierade sprickor och b) på 75 slutna dito. Av figurerna 56 och 57 framgår det att sprickorna har två huvudriktningar, $40-50^{\circ}$ och $130-140^{\circ}$, dock ligger riktningarna mellan de öppna och slutna sprickorna i 90° vinkel till varandra. Vid jämförelse mellan figurerna 54, 55 och 56, 57 framgår det att de ovan nämnda riktningarna finns representerade bland de i grottan uppträdande sprickorna. Anmärkningsvärt är dock att huvudriktningen från grottan, kring N-S, inte alls förekommer i de två hållområdena.

Fig.58 slutligen är en sammanställning av 24 lineament iakttagna i en satellitbild över Gotland (en barmarksregistrering från Landsat 2 i MSS 4). Diagrammet visar att lineamenten har två huvudriktningar. Den dominerande SSE-riktningen återfinns inte bland de sprickor som mätts på ytan men väl bland de underjordiska sprickorna. Den andra riktningen finns däremot inte representerad i något av de övriga rosdiagrammen. Troligtvis utvisar detta lineament berggrundens strykning d v s kanterna på de olika berggrundslagren.

Sprickmätningarna har alltså visat att det i grottan och i de två undersökta kalkhällarna finns två riktningar som förekommer på alla ställen, nämligen NE och SE.

I de delar där den aktiva huvudgången skär genom den massformiga krinoidkalken (från mynningen till Sal 8) förekommer inga raka och uthålliga sprickor. Detta kan vara förklaringen till att grottan här har en tämligen rak sträckning i N-S.

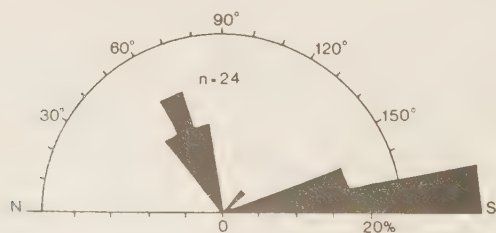


Fig.58 Orienteringen av storskaliga lineament på Gotland, iakttagna i en registrering i MSS 4 utförd av satelliten Landsat 2. Materialet indelat i 10° -klasser.

De i Fossila Systemet uppträdande sprickorna har, som fig.55 visar, två huvudriktningar, N-S och NW. Trots att kalken här till stora delar består av krinoidkalk förekommer det alltså åtskilliga sprickor, och gångarna har huvudsakligen utbildats utefter sprickor. Detta kan förklaras med att gångsystemet till stora delar är utbildat just i kontakten med den lagrade kalken. Det är då troligen sprickorna från den underliggande lagrade kalken som slår igenom, upp i krinoidkalken. Den senare är dessutom inte ihållande massformig, relativt frekvent uppträder den som en lös bankad mägersten. I sådana gångavsnitt förekommer rikligt med instörtningar av taket, se vidare i kapitel 12. Det labyrintartade gångsystem som de två dominerande sprickriktningarna givit upphov till diskuteras i det avslutande kapitlet om grottsystemets uppkomst (kapitel 15).

BERGMEKANISKA UNDERSÖKNINGAR

I mitten av 1970-talet inledde bergsingenjör Anders H Lindén, SGU, en bergmekanisk undersökning av gångarna i Lummelundagrottan. 1978 utvidgade jag denna undersökning med ytterligare sex kontrollpunkter i grottans visningsdal.

Avsikten med undersökningen är att utröna huruvida det förekommer någon rörelse i sprickor och skiktfogar. Mätpunkterna har avsiktligt förlagts till sådana ställen där rörelser främst kan misstänkas ske. På så vis kan de yttre sju mätställena även utnyttjas vid den årliga skyddsinspektion som företages i grottans visningsdal.

Mätställena 1 och 2 (se fig.59) utgöres av i berget fixerade ståldubbar medan övriga består av fixerade glasplattor (objektglas till mikroskop). Glasskivorna har fästs tvärs över sprickor/skiktfogar med hjälp av tvåkomponentslim på slipade, torkade (med gaslåga) och väl rengjorda bergytter. Om en vidgning av sprickorna sker kommer glaset att spricka eller limmet att släppa då båda materialen har låga värden på elastisk och plastisk deformation. Avståndet mellan ståldubbarna mäts med mikrometer eller precisionsskjutmått.

Beskrivning av mätpunkterna i grottans visningsdel. Siffrorna hänvisar till det i fig.59 markerade läget:

1. Två stålskruvar monterade på ca 2 m höjd över golvet i den

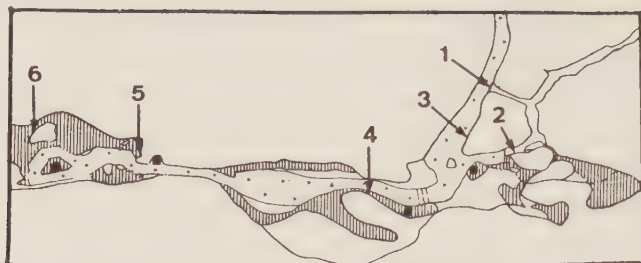


Fig.59 Grottans visningsdel mellan Sal 5 och den norra tunneln. Siffrorna markerar läget av fasta mätpunkter där ev rörelser i berggrunden kan avläsas.

mindre sidospricka som mynnar i tunneln. Avståndet mellan skruvarna 54,1 mm (nedre skruvens övre kant - övre skruvens centrum, tvärs skåran), oförändrat mellan juli 1978 och juni 1980.

2. En stålskruv och längre stång av rostfritt stål. Avståndet 77,8 mm (mätt i skruvens centrum, tvärs skåran). Ingen förändring mellan 1978-80.
1. Glasplatta placerad i tunneltaket.
- 3 och 4. Glasplatta på ca 2 m höjd.
5. Glasplatta på ca 2,5 m höjd.
6. Glasplatta på ca 3 m höjd i vertikal vägg som "hänger ner" från taket.

11. SPELEOTHEMS (DROPPSTENSBILDNINGAR)

När ett luftfyllt utrymme uppstår i en karstgrotta börjar det oftast att ske en deposition av material där. Framdeles behandlas här mineraldepositioner som bildas på platsen, främst via utfällning av kalk ur vatten. Då mineraldepositionerna för det mesta är kemiskt bildade kallas de ofta för kemiska avlagringar, andra namn är grottformationer, (cave formation), grottkonkretioner och grottmineral (cave minerals). En annan vanlig term är droppstensbildningar, men denna benämning liksom de övriga

nämnda ersättes nu alltmera av termen speleothems. Ordet är sammansatt av de grekiska orden "spelaion" = grotta och "thema" = deposition. Uttrycket föreslogs av Moore 1952 men det dröjde ända till slutet av 60-talet innan det blev allmänt accepterat i USA och under 70-talet kom beteckningen att bli internationell. Av denna anledning anser jag det lämpligt att vi använder termen även i vårt land, trots de språkliga böjningsproblem som därvid uppstår.

De speleothems som är mest kända bland den breda allmänheten är droppstensbildningarna av kalcit. Men likväl som droppstenar bara är en av de många former som kan förekomma i en grotta är kalcit bara ett av de många mineral som bygger upp formerna. Moore (1979) anger att till mitten av 1979 var 97 olika grottmineral kända, samt att ett flertal av dem enbart har påträffats i karstgrottor. Carol Hill (1976) har i sin utmärkta bok "Cave minerals" sammanfattat alla de mineral som var kända fram till 1973 (88 st), hon redogör också för de olika former (speleothems) som mineralen uppträder i.

Åtskilliga av de kända grottmineralen förekommer ytterst sparsamt liksom vissa former. Detta attraherar givetvis mineralsamlare vilket kan få förödande konsekvenser för mineralet (eller formen) ifråga. Av denna anledning finns det inom den internationella speleologin en oskriven lag att inga speleothems får skadas eller avlägsnas från en grotta annat än i rent vetenskapligt syfte.

Avsikten med detta kapitel är att presentera de olika slag av speleothems som förekommer i Lummelundagrottan, var de förekommer och i vilken omfattning. Inbakat i beskrivningen finns också en redogörelse för hur de bildas enligt senaste rön på området. Speciellt kommer heliktiter och bergmjölk att diskuteras då det fortfarande råder en viss tvekan om hur dessa former uppkommer, av samma anledning görs en litteratursammanställning av de senaste publicerade undersökningarna om färger på speleothems.

KLASSIFICERING AV SPELEOTHEMS - FÖREKOMSTER I SVERIGE

De svenska grottorna är tämligen fattiga på speleothems jämfört med t ex karstgrottor på kontinenten. Den i särklass rikaste

förekomsten såväl till antal som till former finns i Lummelundagrottan. Av de övriga grottor är det främst Labyrintgrottan och Sotbäcksgrottan i Tärnafjällen samt Lullihatjärrogrottan och Nedre Kåkkasjåkkgrottan vid Torne träsk, som har nämnvärda förekomster av speleothems.

Även när det gäller de mineral som bygger upp formationerna är utbudet dåligt i Sverige. Ännu så länge känner jag bara till former uppbyggda av kalcit och is, men de sparsamma förekomsterna av bergmjölk kan eventuellt innehålla andra mineral än kalcit.

Speleothems kan klassificeras på flera olika sätt vilket har medfört att någon allmänt accepterad indelning för närvarande inte finns. I tre sammanfattande verk av Sweeting (1972) och White (1972 och -76) presenteras indelningar som baserar sig på former och bildningssätt. Nedanstående sammanställning bygger på ovanstående arbeten (främst White 1976). Den omfattar alla de former som kan bildas av kalciumkarbonat, men indelningen är även tillämpbar för flera andra grottmineral. I de fall där en term har översatts till svenska och där ordet inte tidigare har funnits på vårt språk anges engelska beteckningar inom parentes, samma sak gäller även för äldre svenska termer som inte är direktöversättningar.

De former som återfunnits i Lummelundagrottan har markerats med (L) i sammanställningen nedan. (S) markerar att formen har påträffats på annat håll i Sverige.

A. Droppstens och flowstone-bildningar. Tillväxten kontrollerad av tyngdkraften.

1. Stalaktiter (L)
2. Stalagmiter och kolonner (L)
3. Draperier (L)
4. Flowstone (L)

B. Erratiska former (erratic forms). Tillväxten ej tyngdkraftskontrollerad.

1. Sköldar (skields, pallets)
2. Heliktiter (L)
3. Botryoidala former (ex cave popcorn, cave coral, cave grape) (S)
4. Grottblommor (anthodites) (S)

5. Grottpärlor (S)

6. Bergmjölk (L)

C. Subakvatiska former:

1. Rimstone (L)

2. Lily pads (L)

3. Grottkristaller

4. Övriga subakvatiska bildningar (L)

Alla former som förekommer i Lummelundagrottan behandlas längre fram i texten med avseende på förekomst, utseende och bildnings-sätt. Övriga speleothems beskrivs kortfattad nedan då en över-skådlig svensk beskrivning saknas.

B:1 Sköldar: Två parallella skivor, med en smal spricka emellan, som växer vinkelrätt ut från väggen i horisontalläge. De kallas också för paletter då de är rundade till formen. Sköldarna kan vara upp till fem m i diameter medan de bara blir mellan fyra och tio cm tjocka. Oftast är de horisontellt liggande skivorna uppburna av droppstenar som är förankrade i underlaget, det är därför de kan uppnå en ansenlig ytstorlek trots sin ringa tjocklek.

B:3 Botryoidala former: Dels omfattar denna gruppen s k globuliter vilka är små speleothems som växer på golv och väggar, de enskilda formerna benämnes grottpopcorn, grottdruvor och grottkoraller vilket direkt anger deras storlek och utseende. Spattemiter är den andra typen av botryoidala former och den kan bli betydligt större, upp till en m i diameter. De har inget bestämt utseende utan termen står snarast för speleothems bildande av en hopkittad massa av finkorninga klastiska sediment och kalcit. I Sverige har spattemiter påträffats i Labyrintgrottan i Tärnafjällen. De består där av lera och kalcit, är ca en dm i storlek och utseendet beskrives bäst av det namn de fått på svenska, "lergubbar". Något sämre utbildade spattemiter förekommer i Sotbäcksgrottan (Helldén 1974).

B:4 Grottblommor: Mycket oregelbundna former som kan påminna om blomsterställningar. De enskilda "blommorna" växer oftast tätt samman och bildar stora klasar eller "buketter". De bildas främst av aragonit (ett kalkmineral) och gips, men

i vårt land finns en känd förekomst av isblommor i en grotta vid Vadvetjåkka nationalpark (beskrivna i Engh 1980).

C:3 Grottkristaller: I ett övermättat vatten kan kalcit fällas ut och växa som kristaller på bergväggarna. Detta sker vanligast i vattensamlingar i grottor, men det kan även ske i helt vattenfyllda grottor och när vattnet sedan sjunker undan blir resultatet en äkta kristallgrotta där golv, väggar och tak är täckta av glittrande kristaller som i ett drusrum. Tyvärr är detta mycket ovanligt då det utfällda mineralet oftast är förorenat vilket gör att rena kristallformer inte bildas.

FYSISKA EGENSKAPER HOS SPELEOTHEMS

Vanliga kalkkristaller som är helt fria från föroreningar är genomskinliga som glas. Detta är relativt sällsynt när det gäller speleothems, men i Sverige förekommer sådana kalkutfällningar i en del fjällgrottor. För det mesta innehåller dock speleothems någon form av förorening eller har en speciell kristallstruktur som ger dem färg.

Ända fram till början av 1970-talet ansåg man att färgerna berodde på förekomst av vissa spårmetaller, svart ansågs t ex bero på förekomst av mangan eller järn. Under 70-talet har emellertid en del undersökningar visat att förklaringen inte är riktigt så enkel. Gascoyne (1977) har trots noggranna analyser inte funnit något samband mellan färgen på speleothems och innehållet av spårelement. Han tror istället att det kan vara det organiska innehållet och ev optiska förhållanden som åstadkommer färgvariationerna. Ungefär samma sak konstaterade Krål två år tidigare (1975a) d v s att färgerna ej berodde på metalljoner utan på kristalluppbyggnad (med undantag). Så fann han t ex att blodröd färg berodde på en perfekt kompaktivitet i kristallbyggnaden. Grå-svart ansåg han hade sitt upphov i kolloidala partiklar från ovanför liggande jord. Det senare har också Laverty & Crabtree (1978) konstaterat, de anger att den vanliga brunröda färgen (mycket vanlig, ff anm) orsakas av humusämnen ("incidentally" kan den dock bero på järnkomplexet från humusen). Vytras & Vytrasova (1976) har påvisat järn, fast i mycket små mängder, i gula-rostfärgade speleothems vilket de anser ev. kan förklara färgen. Den gula-röda färgen

måste däremot förklaras på annat sätt då de inte hittat några som helst metalljoner i den färgvarianten.

Vissa speleothems har förmåga att fosforescera d v s avge ljus efter en kort stunds belysning. Detta är relativt sällsynt men i Sverige har vi dock ett litet antal stalaktiter i Labyrintgrottan som har den egenskapen. Droppstenarna är ofärgade och nästan genomskinliga, efter att ha belysts med en fotoblixt avger de ett grönvitt ljus i 10-20 sek.

De flesta speleothems i världen består av kalcit men många är uppbyggda av mineralet aragonit. Kalcit och aragonit har samma kemiska sammansättning, CaCO_3 , d v s de utgör båda vad man i dagligt tal kallar för kalk, men de har olika kristallform och densitet. Nu är det visserligen inte teoretiskt möjligt för aragonit att bildas i grottor! (för att aragonit skall vara termodynamiskt stabil i grottor bör trycket vara över 3 000 atm, se bl a White 1976, Moore & Sullivan 1978), men trots detta är aragonit efter kalcit och gips det vanligast förekommande grottn mineralet. En fråga som intresserat mineraloger och speleologer är när och varför det ena eller andra mineralet bildas. Moore (1954a) anger att det är temperaturen vid bildningstillfället som avgör vilken kristallform som bildas. Hans undersökning visade att om temperaturen var över 15°C så fälldes aragonit ut, i annat fall kalcit. Senare samma år konstaterade Murray (1954) att en hög magnesiumhalt i vattnet kan möjliggöra aragonitbildning även vid lägre temperatur. Pobeguín (1957) konstaterade vid experiment i ett underjordiskt laboratorium i Frankrike att även avsättningshastigheten var av betydelse. En jämn insippring av lösningen medförde att kalcit bildades medan en oregelbunden tillförsel av vatten medförde att grovkristallin kalcit + finkornig aragonit bildades. Han konstaterade också att under 5°C kunde enbart kalcit bildas. Det finns i litteraturen flera förslag på temperaturgränser erhållna efter undersökningar in situ, men Pobeguíns nedre gräns på 5°C ligger betydligt under dessa varför det är möjligt att den praktiska nedre gränsen ligger mellan $10-15^\circ\text{C}$. Någon övre gräns har emellertid ännu ingen fastställt, Sweeting (1972) anger diplomatiskt att "aragonit förefaller att företrädesvis bildas vid högre temperatur och kalcit vid lägre". Sekundära avlagringar av dessa båda kalkmineraler kallas i speleologiska sammanhang ofta för travertin (eng) eller sinter (ty).

Framdeles kommer dessa termer (främst travertin) att användas vid beskrivningen av i grottan förekommande speleothems. Märk väl att alla undersökta konkretioner i grottan består av kalcit (bergmjölken ev undantagen då den p g a sin porositet ej går att undersöka som övriga speleothems). Enklast särskiljes de båda mineralen genom att små bitar av homogena prov släpps ner i bromoformlösning varvid kalciten flyter och aragoniten sjunker.

Så länge tillförsel av mineralmättat vatten pågår till speleothemsens är de "levande" d v s de växer och har en klar lyster. Om tillförseln av vatten upphör eller om vattnet övergår till att bli aggressivt (löser kalk istället för att fälla ut) upphör formationen att växa och förlorar sin lyster, de benämnes då "döda". Detta händer givetvis även med speleothems som bryts av och förs ut ur en grotta. Förutom att de då tappas lystern kan det t o m hända att ytan snabbt vittrar sönder, Hill (1976) anger att ytan kan bli så mjuk att ett finger kan stickas in över tre cm, hon nämner också att orsaken till denna nedbrytning ännu är okänd.

De falska årsringarna i stalaktiter anses bero på att avsättningen tillfälligtvis upphört och att en vittringshud bildats. När sedan tillväxten påbörjades igen bildas nya kristaller utanpå vittringshuden och försätter växa tills en ny vittringshud bildas (Moore & Sullivan 1978).

HUR SPELEOTHEMS AV KALCIUMKARBONAT BILDAS

I kapitel 6 redogöres för hur vatten kan lösa kalksten med hjälp av koldioxid som först gått i lösning i vattnet. Det vatten som bildar speleothems faller först som nederbörd ovanför grottan, infiltreras ner genom ev. förekommande jordlager och vidare genom berggrunden tills det sipprar fram i grottan via smala sprickor. Det som är av störst betydelse för bildningen av travertin är hur mycket koldioxid som finns löst i vattnet. Tränger vattnet först ner genom ett jordlager kan stora mängder CO_2 gå i lösning då markatmosfären kan ha upp till 100 ggr så hög koldioxidhalt som atmosfären (Biro 1954). Detta medför att betydande mängder kalk löses upp i vattnet när det långsamt söker sig ner genom kalkberggrunden. Král (1975b) har dessutom påvisat att vattnet

i de trånga sprickorna står under hydrostatiskt tryck vilket gör att ytterligare kalk kan gå i lösning.

När vattnet så tränger fram i grottan i form av en droppe eller en tunn vattenfilm kan utfällning av kalk ske. Utfällningen äger rum om vattnet är eller blir övermättat på kalciumkarbonat så att löslighetsprodukten överskrides. Vattnet kan dels vara övermättat p g a det hydrostatiska trycket enligt ovan, och när det tränger fram i grottan minskas trycket varvid kalk kan fällas ut. Den vanligaste orsaken till övermättnad är dock att koldioxid avgår från vattnet så att detta förmår hålla mindre kalk i lösning. Koldioxiden i vattnet har ju oftast ett högre partialtryck än koldioxiden i grottatmosfären vilket gör att CO_2 lämnar vätskan p g a strävan efter jämvikt. I grottor som har en luftfuktighet under 100 % kan även en avdunstning av vattnet ske vilket kan medföra övermättnad och utfällning.

Olika former av speleothems uppstår beroende på hur, var och i vilken mängd vattnet tränger fram samt hur snabbt och hur mycket kalk som fälls ut. Ett långsamt droppande vatten ger t ex företrädesvis upphov till droppstenar (stalaktiter och stalagmiter).

STALAKTITER

Stalaktiten, d v s den hängande droppstenen, har blivit något av en symbol för grottor då det är den i särklass mest kända formationen. Beteckningen användes för första gången av den danske naturalisten Worm år 1655 (Sweeting 1972).

Enligt Jennings (1971) börjar alla stalaktiter sin tillväxt på samma sätt. Från mikroskopiska sprickor i tak eller överhängande partier sipprar övermättat vatten fram och en vattendroppe bildas. Överskrides då löslighetsprodukten för t ex kalcit i droppen utkristalliseras mineralet och avsätts som små kristaller i en ring kring droppen. För var droppe avsätts det så ytterligare material. Så småningom bildas ett ihåligt rör som växer till nedåt, en s k stråstalaktit har "fötts". Förloppet är åskådliggjort i fig.60. Figuren visar också vad som händer om den vattenledande kanalen i strået täpps igen. Vattnet kommer då istället att sippa fram på utsidan av röret och avsätta mineralet där. Då vattnet har en tendens att sprida sig runt hela stalaktiten sker kalcitavsättningen relativt jämt runtom, men för det mesta avsätts

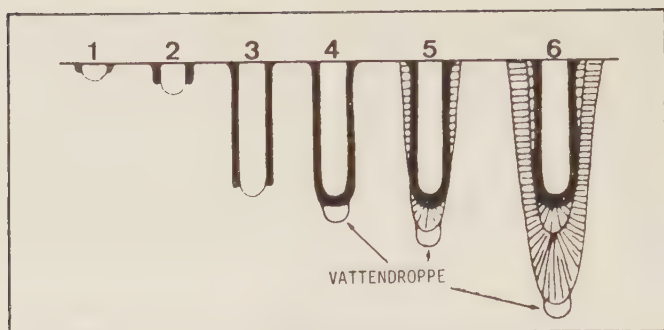


Fig.60 Hur stalaktiter bildas. 1-3) kring vattendroppar kristalliserar en ring av utfällt mineral, ringen växer till nedåt=stråstalaktit. 4) röret täpps till, vattnet sipprar på utsidan istället och avsätter där mineralet = en konisk stalaktit bildas (5-6). Efter Jennings 1971.

mest mineral längst upp och minst längst ner varvid en konisk stalaktit bildas. Den koniska formen är den ideella formen men det är inte ovanligt att t ex jämntjocka eller helt oregelbundna stalaktiter bildas. Täpps inte röret igen kan stråstalaktiterna nå en avsevärd längd (4,5 m den längsta kända, Bögli 1978) trots att de bara har en diameter mellan 4 och 6 mm. Då den koniska stalaktiten är bredast vid basen kan den uppnå betydande längd. Enligt Guinness Book of Record 1978 är den längsta kända stalaktiten 59 m lång, den finns i en grotta i södra Spanien. Det är dock inte ovanligt att stalaktiter faller ner därför att egen tyngden blir för stor.

När vattnet sipprar fram över stalaktitens yta växer kalcitkristallerna vanligtvis vinkelrät ut från droppstenen. Fig.61 visar detta i ett tvärsnitt och i ett längdsnitt av en stalaktit. Figuren visar också att det finns en cirkulär struktur som påminner om årsringar i ett träd. Åtskilliga försök har gjorts för att relatera ringarna till tidsperioder men med mindre lyckade resultat. Ringarna uppstår när vattentillförseln upphör varvid kristallerna får en vittringshud, när sedan vattenflödet återvänder börjar en ny ring av kristaller att växa ovanpå vittringshuden. Teorin bakom dateringsförsöken är att vittringshuden bör gå att relatera till längre torrperioder och kristallerna till pluvialtider.

I den speleologiska litteraturen var det förr vanligt med ålders-

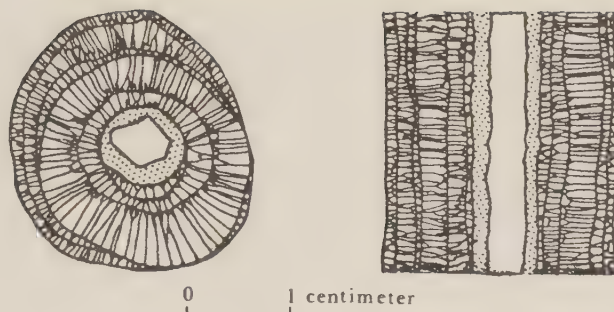


Fig. 61 Orientering av enskilda kristaller i en konisk stalaktit. Vänster = tvärsnitt, Höger = längdsnitt. Observera att stalaktiten är ihålig i mitten. Efter Moore & Sullivan 1978.

angivelser på stalaktiter, där man utgick ifrån att droppstenarna växer med en viss hastighet per år. Så har t ex Tell (1961) förmodat att stalaktiterna i Lummelundagrottan växer med 1 mm på 15-20 år. De moderna radiometriskas dateringarna av speleothems har visat att det finns en viss sanning i antagandena (som baserade sig på praktiska mätningar med långa mellanrum), men att några generella regler inte tycks gå att uppställa. Hänsyn måste nämligen tas till klimatet under avsättningen (temperatur och nederbörd), markytan (jordtäcke och vegetation), typen av grotta (statisk el dynamisk) samt till stalaktitens struktur. För att illustrera vad bildningsmiljö och struktur kan betyda vill jag visa ett exempel: Bilden 27 är tagen i Flemings tunnel som blottades vid utgrävningarna på Helgeandsholmen i Stockholm 1978. Flera av droppstenarna i bilden överstiger en m i längd trots att de säkerligen inte är mer än ca 250 år gamla (tunneln har varit ur bruk sedan 1742). Men stalaktiterna där är bildade av kalk som härstammar från cement och de har en mycket porös struktur jämfört med droppstenar i djupare karstgrottor. Ålder och tillväxthastighet hos speleothems kommer att diskuteras ytterligare i slutet av kapitlet.

I Lummelundagrottans utforskade delar finns ca 3 000 stalaktiter. De flesta, ca 2 200, och mest välutbildade finns i Fossila Systemet. Omkring 85 % utgöres av stråstalaktiter vilket är normalt för grottor i denna klimatzon enligt Sweeting (1972). Av de övriga ca 15 % är det få som har en perfekt konisk form, istället



Bild 27. Stråstalaktiter och stalagmiter i Flemmings tunnel, Helgeandsholmen 1978 före utgrävningen. Foto Sven Gunnvall och L-E Åström.

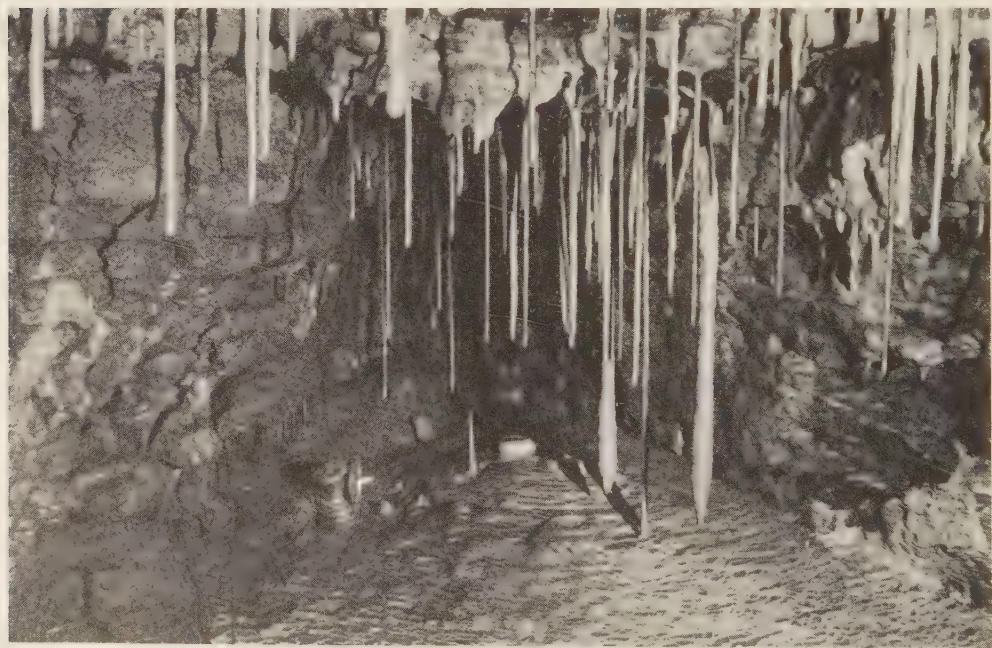


Bild 28. Parti med stråstalaktiter, flowstone (över sediment), kolonner, koniska stalaktiter och stalagmiter. En nedfallen stråstalaktit har gjutits fast i flowstonen i upprät ställning. Bilden tagen i Droppstensgalleriet. Foto Mischa Gavrjusjov.

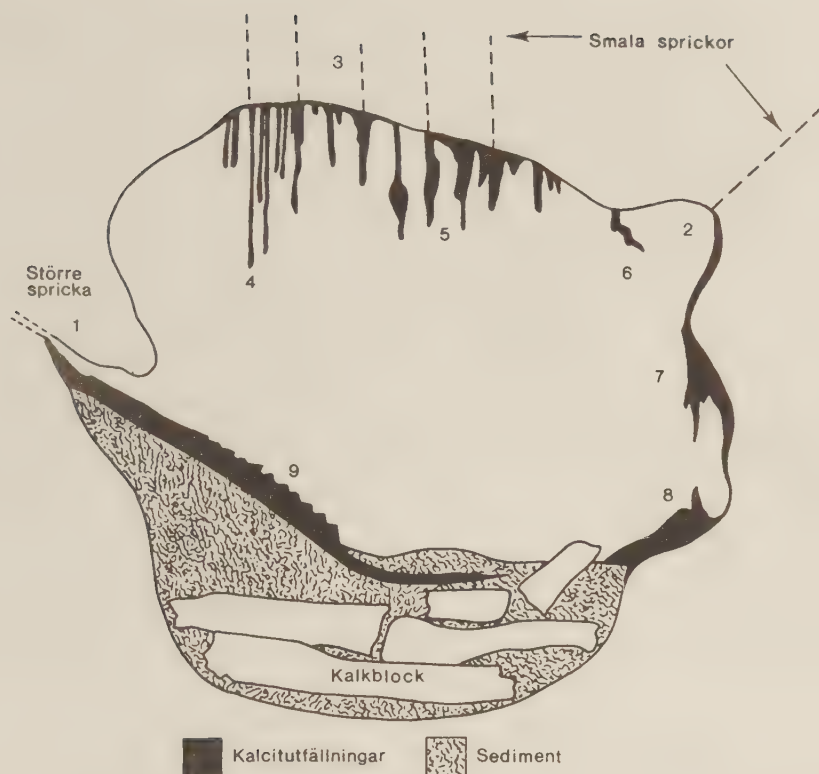


Fig.62 Principskiss av olika speleothems som uppträder i Lummelundagrottan.
 4-5 = strå- och koniska stalaktiter, 6 = heliktit, 7 = draperi,
 8 = flowstone med stalagmit, 9 = flowstone med små rimpools.

är de jämntjocka eller oregelbundna i formen. De vanligast uppträdande stalaktitformerna har åskådliggjorts i fig.62:5 och 6. Bild 28 som är en närbild av bildningarna längst till höger i fotografiet på omslaget, visar en del ovanliga former, bl a två strån som nedtill växt samman och bildat en spolformad stalaktit. Förekomster av speleothems i grottan har markerats på kartan i fig.63. De med stjärnor markerade droppstensbildningarna utgöres av stalaktiter, stalagmiter och heliktiter där de förstnämnda klart dominerar i antal. Även draperierna är inkluderade i denna grupp då de för det mesta uppträder tillsammans med stalaktiter. De största koncentrationerna i den aktiva delen av grottan finns vid 2 och 3 i visningsdelen (siffrorna hänvisar till läget, markerat i fig.63). I grottans fossila delar uppträder droppstensbildningar i de flesta gångarna men de största samlade förekom-

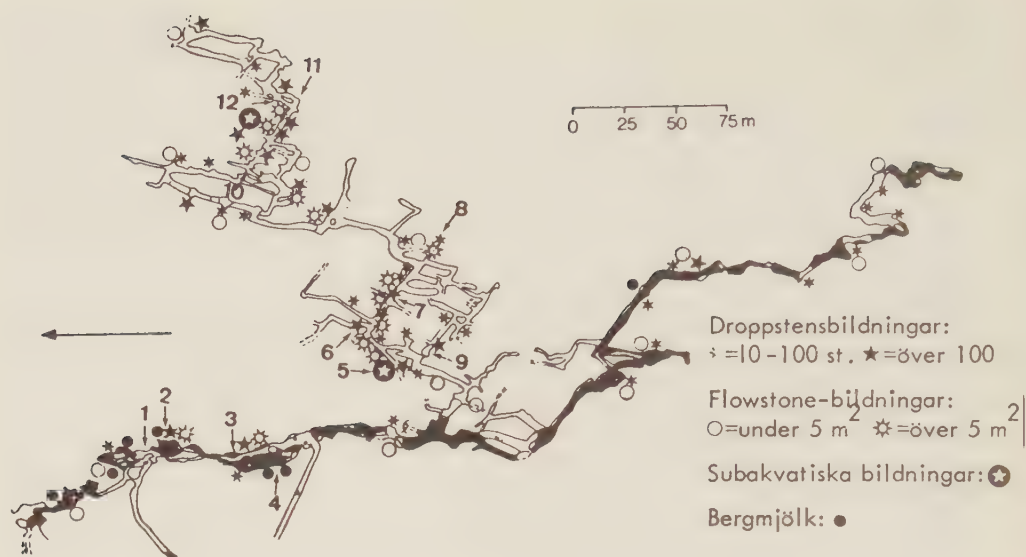


Fig.63 Karta över Lummelundagrottan med inlagda förekomster av speleothems.

terna finns i de två gångarna mellan 6 och 8 samt mellan 10 och 11. Den största koncentrationen av stalaktiter finns vid 7 varifrån bilden på omslaget är hämtad. De längsta stalaktiterna finns i den sk Droppstengången vid 6 i fig.63, där den längsta stråstalaktiten är 86 cm lång (avbildad i mitten av bild 29). Långa stalaktiter är dock ovanliga i grottan, merparten har en längd av endast 5-20 cm som de i bild 32.

STALAGMITER OCH KOLONNER

Vatten som droppar från tak eller stalaktiter kommer dels under fallet och dels vid landningen att avge koldioxid till grottatmosfären vilket kan medföra utfällningar av det lösta mineralet där droppen hamnar. Lager på lager kalcit kommer på så sätt att avsättas och en stalagmit växer upp från underlaget. Är förutsättningarna goda kan formationerna få ett komplicerat utseende och uppnå ansevliga dimensioner. Sweeting (1972) anger att det i Aggtelekgrottan i Ungern finns stalagmiter som är över 40 m höga. Även på bredden kan de uppnå ansevliga dimensioner. Stalagmiter är de bildningar som generellt sett binder den

största volymen utfällda mineral i grottor (White 1976). Orsaken är att betydligt mera koldioxid hinner lämna vattnet vid stalagmitbildning än när t ex en stalaktit bildas. Är luften dessutom varm och har en luftfuktighet som understiger 100 % kan en avdunstning av vattnet också ske. Det senare anses var orsaken till att mängden speleothems i grottor ökar med varmare klimat enligt Sweeting (1972). Hon anger därtill att stalagmiter uppträder sparsamt i NW-Europa och att de där är dåligt utbildade. Detta stämmer bra in på Lummelundagrottan där mindre än 50 stalagmiter påträffats.

Bild 31 av det s k Altaret i Sal 5 visar de mest välutbildade stalagmiterna i hela grottan. Ovanför karbidlampan i bilden växer en bred och dåligt utformad stalagmit. Den visar vad som händer på de flesta ställen i grottan där stalagmiter skulle kunna ha bildats. Utfällningen sker inte på ett ställe utan över en stor yta varvid flowstone bildas istället för stalagmiter. Detta framgår även tydligt i bilderna 29 och 32. Troligen beror flowstonebildningen på en rikare vattentillförsel (Franke 1963).

När en stalaktit växer samman med en stalagmit uppstår en s k kolonn. Ett fåtal sådana finns i grottan. Bild 28 visar två "falska" kolonner d v s två stalaktiter som växt ända ner till underlaget, i det här fallet flowstone. I bilden syns också en låg och bred stalagmit och något som ser ut som en smal dito. Den senare är dock en stalaktit som fallit ner och fastnat upprätt i de lösa sediment som finns under flowstonen, före det travertinet avsattes.

DRAPERIER

Om vattendroppar som tränger fram ur en spricka inte faller ner direkt, utan först rinner längs en lutande yta, kan draperier bildas. Vattendroppen kommer då att avsätta kalcit där den rinner fram och så småningom bildas en oregelbunden skiva. I fig.62:7 och i fig. 64 finns en principskiss av hur draperier bildas av det vatten som rinner fram ur sprickor. Draperierna blir sällan tjockare än en stråstalaktit (6 mm) men ytmässigt kan de uppnå ansevärd storlek. Typiskt för dem är att de inte växer rakt ut som skivor, istället veckar de sig som draperier, därav namnet. Det är inte ovanligt att de uppvisar en bandad struktur av olika färgnyanser. Denna struktur kan ibland få

draperier att se ut som baconskivor vilket har gjort att draperier i USA ibland kallas för cave bacon. Bandningen framträder bäst i exemplar som är mer eller mindre genomskinliga, men även i opaka draperier kan strukturen iakttas då man placerar en ljuskälla på baksidan.

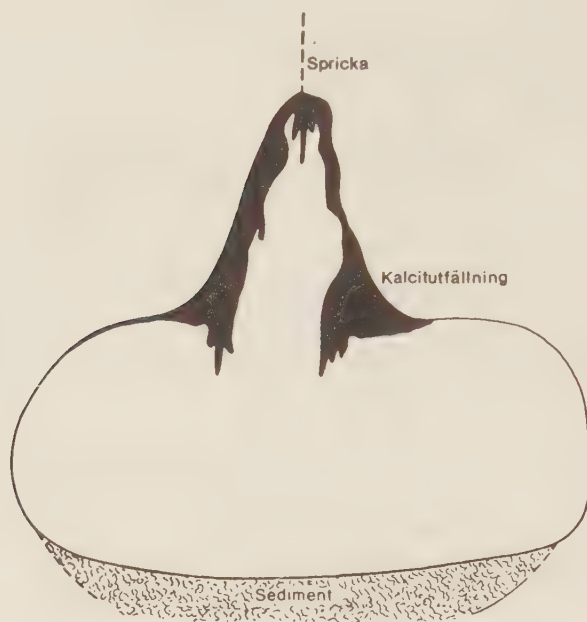


Fig.64 Kring sprickan i taket har en intensifierad kalklösning ägt rum och en "lösningficka" bildats. När gången blev torr-lagd började kalcit fällas ut från det ursprickan framsipprande vattnet. Den långsträckta lösningfickan är helt täckt med flowstone och draperier: Bilden illustrerar gången mellan Lilypadgången och Droppstensgalleriet (fig.41).

Stora och välutbildade draperier förekommer endast på ett dussin platser i grottan. Bild 30 visar en sådan förekomst i den del av huvudgången som benämnes Tunneln. Sprickan i bilden är en s k lösningficka (korrosionskolk). När grottgången var helt vattenfylld och vatten trängde in via en spricka i taket uppstod blandningskorrosion (förklaras i kapitel 15) varvid kalken kring sprickans mynning löstes ut. Det allmänna utseendet av sådana fickor i Lummelundagrottan illustreras av fig.64. Om vatten har fortsatt tränga in via sprickan efter det att vattnet i gången har sjunkit undan har det istället skett en utfällning av kalk varvid bl a draperier bildas. Lösningfickor av denna typ förekommer huvudsakligen i Fossila Systemet.

I bild 29, ovanför personens huvud, hänger det dels ett vanligt draperi och dels ett som "rullat ihop sig" och ser ut som en kraftig stalaktit. Denna senare typ av draperier förekommer på



Bild 29. Droppstensgången i Fossila Systemet. Grottans längsta stråstalaktiter med mäktig underliggande flowstone-stalagmit. Över mitt huvud hänger ett "ihoprullat" draperi. Foto Mischa Gavrjusjov.



Bild 30. Draperier av normalt utseende i Tunneln. Foto Mischa Gavrjusjov.

sex ställen i grottan (se bl a ovanför lampan i bild 31). Den vanligast förekommande typen av draperier i Lummelundagrottan är små sådana som växer vid basen av stalaktiter. Ett flertal av denna typ finns avbildade i fotona 29,31 och 32.

FLOWSTONE

Då det inte finns något svenskt namn på denna travertinbildning och en direktöversättning inte är lämplig använder jag den engelskpråkiga beteckningen. Detta gäller f ö för alla termer som ej går att direktöversätta. Formen kan kort beskrivas som en avsättning vilket tycks "rinna" fram över underlaget. Bilderna 31 och 32 illustrerar bäst den typ som uppträder i Lummelundagrottan liksom fig. 62:9 och 2 samt fig.64.

Vattnet som travertinet avsätts från har, liksom vid droppstensbildningen, sipprat in i grottan via sprickor. När vattnet rinner fram över underlaget som en tunn film blir kontaktytan med luften stor varvid det blir lättare för koldioxiden att diffundera ut i grottatmosfären. De avlånga kalcitkristallerna växer vinkelrät ut från flödesriktningen d v s rakt ut från golv eller väggar. Kristallerna kan liksom hos droppstenarna uppträda i olika lager avskilda av vittringshud.

I Lummelundagrottan är flowstone volymmässigt den dominerande travertinavlagringen. Den flowstone som uppträder på golvet i grottgångarna har främst bildats genom droppande vatten medan den som förekommer på väggarna har bildats dels genom droppande vatten och dels genom en från sprickor eller skiktfogar långsamt framsipprande vattenfilm. Men som fig.62:9 visar förekommer det även flowstone i golvlägen, bildade via ett från en spricka framrinnande vatten. Oftast är dessa sidosprickor av sådana dimensioner att det under speciella omständigheter kan spolas ner jord genom dem. Fig.62:9 visar att det på sådana ställen kan finnas jord som är överlagrad med travertin. Figuren visar bara en lagerväxling, men i partiet benämnt Brevlådan har åtta travertinlager påträffats varvade med lösa sediment. Detta finns illustrerat i en jordartsprofil, fig.68:14. Bild 41 visar ett parti nedanför en spricka där jord och travertin lagras på varandra.



Bild 31. Altaret i Sal 5. Bilden visar de bäst utbildade stalagmiterna i grottan samt hur väggen är täckt med flowstone. Övergången mellan droppstenar och draperier framgår tydligt liksom hur stråstalaktiter omvandlats till koniska stalaktiter. Foto Mischa Gavrusjov.



Bild 32. Droppstengalleriets östra del. Den vanligaste storleken på och typen av stalaktiter i grottan där en del växt ut till små draperier. Mäktiga flowstone-avlagringar på golvet. Foto Rolf Engh.



Bild 33. En helt slät flowstonebildning i Promenadgångens östligaste del, tumstocken i mitten är 20 cm. Foto Rolf Engh.



Bild 34. En för Fossila Systemet typisk flowstone-bildning där det bildats små rimestone-dammar. Karbidlampan ungefär 13 cm hög. Foto Mischa Gavrusjov.

Den ideella flowstoneavlagringen har en slät överyta. En sådan avlagring finns bara synlig (flera andra finns däremot under sediment) på ett enda ställe i grottan, vid 12 i fig.63. Bild 33 visar hur denna travertinutfällning ser ut. Övriga avlagringar har en överyta som är mer eller mindre terasserad på ett sätt som framgår av bild 34. Det bildas små dammar med upp till två cm höga kanter som innesluter vattnet. Det är därför tveksamt om inte de mest utpräglade av dessa former borde kallas för rimstone med tanke på att utfällningen till stor del sker subakvatiskt. De kallas också för grotterasser enligt Hill (1973). Totalt finns det i grottan ca 210 m² flowstone. Lagrens mäktighet varierar vanligen från några mm till ca 5 cm, men enstaka bildningar, som t ex Örnvingen i turistdelen av grottan (vid fig.63:1), är dock betydligt mäktigare. De terassformade travertinbildningarna i Lummelundagrottan är unika för svenska förhållande, i övriga svenska karstgrottor har jag enbart iakttagit flowstone med en relativt slät överyta.

HELIKTITER

Hela den grupp av speleothems som heliktiterna hör till, "egenomsliga" former (erratic forms), har fått sitt namn då deras genes har förbryllat forskare i snart ett århundrade. Eftersom indelningen i sex olika typer delvis baserar sig på former är det troligt att det finns variationer i de mekanismer som ligger bakom deras bildande. Två av de sex formerna, heliktiter och bergmjölk förekommer i Lummelundagrottan. De presenteras här tillsammans med de senaste försöken att förklara hur de bildas.

Heliktiter beskrivs ibland som galna stalaktiter vilket är en träffande beskrivning med tanke på de otroliga former som kan bildas. Andra benämningar är eccentrics (eng), exentriker (ty) och exentriques (fr). Enstaka författare, som White (1976), skiljer på eccentrics och heliktiter. Han anser att eccentrics är vertikalt hängande stråstalaktiter där röret täppts till och/eller starka luftströmmar fått droppstenen att växa i en annan vinkel. Att beskriva former på heliktiter låter sig inte göras då de tycks kunna se ut i stort sett hur som helst. Utgångsformen är dock ofta en stalaktit. Fig.65 visar några tänkbara for-

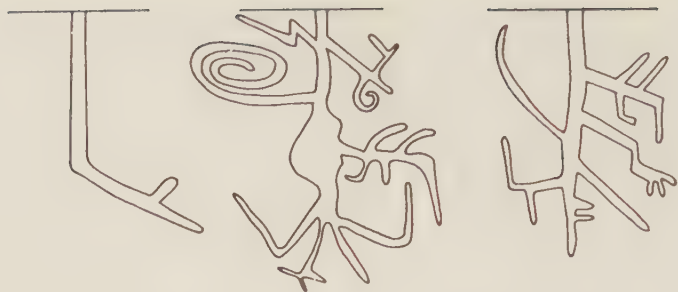


Fig.65 Skisser av hur heliktiter kan se ut. I Lummelundagrottan uppträder heliktiter av den typ som avbildats till vänster i figuren.

mer där den vänstra är avbildning av en heliktit som finns i Lummelundagrottan (vid 9 i fig.63). Det är denna typ som av White benämnes för eccentrics. De heliktiter som finns i grottan är enbart av denna typ, se även fig. 63:6. Totalt finns det inte mer än ca 20 kända heliktiter i grottan och bara en av dem är längre än 25 cm.

Hur heliktiterna bildas och växer har diskuterats ända sedan slutet av 1800-talet p g a att deras tillväxt tycks bryta mot tyngd-lagen. Ett tag ansågs problemet löst och de kallades då för anemoliter då man trodde att det var grottvindar som gav upphov till de egendomliga formerna. Andra förklaringar var att de härrörde från spindelnät, svampar eller att de kondenserat direkt från en vattenånga som innehöll kalk (Moore & Sullivan 1978).

Man vet idag att de bildas av ett mycket långsamt framsipprande vatten, som står under hydrostatiskt tryck och tränger fram ur en mycket trång öppning (Moore 1954b). Men hur själva formen kan uppstå är man fortfarande oense om. Cser & Maucha (1968) påstod att orsaken var en aerosoleffekt i grottatmosfären i kombination med jordens elektromagnetiska fält. White (1976) anger att de bildas när kristalltillväxten är en starkare kraft än den hydrauliska kraften och tyngdkraften, medan Bögli (1978) säger att de bildas när ytvattenspanningen är starkare än gravitationen. Davies & Morgan (1977) förespråkar den s k kapillärteorin som varit populär under 1960 och 70-talet. Enligt denna bildas heliktiter när vattnet sipprar så långsamt fram att små kemiska och fysikaliska förändringar kan orsaka omorientering av kristallstrukturen i kalciten. Kempe & Spaeth (1977) var, enligt vad de

själva skriver, övertygade "kapillärister", men efter att bl a ha studerat kristallstrukturen i svepelektronmikroskop anser de att bildningsmekanismen fortfarande är ett mysterium, och det är där man står idag. Personligen tror jag dock att lösningen står att finna inom ramen för kapillärteorin då vatten som passerar ytterst fina kapillärer uppvisar märkliga egenskaper (se Alexandersson 1975) och relativt litet är känt om dessa egenskaper, speciellt när vattnet innehåller lösta mineral.

BERGMJÖLK

Bergmjölk är en direkt översättning av tyskans Bergmilch. Ett vanligare namn är dock Mondmilch (eng moonmilk) som har använts ända sedan 1455 (enligt Bögli 1978). Man tror att förstavelsen härstammar från den Schweiziska grottan Mondloch där en av de första kända förekomsterna av bergmjölk påträffades. Orsaken till att bergmjölk finns omnämnt i äldre skrifter är förmodligen de magiska egenskaper som tillskrevs mineralet, bl a har det använts inom folkmedicinen.

Bergmjölken uppträder dels som en våt grötliknande massa och dels i en torr och spröd form. Den våta formen ser ut som en vit slät gröt och gnuggar man den mellan fingrarna har den en konsistens som bredbar ost (det är denna våta form som har använts som medicin). Den torra formen beskrivs längre fram då det är den som förekommer i Lummelundagrottan.

Utfällningen består av ett aggregat av mikrokristallina mineral och enligt Hill (1976) finns det nio olika mineral som kan bilda bergmjölk. Kalciumvarianten är uppbyggd av mycket tunna (ca en micron) och upp till 8 mm långa nålkristaller (Maleev & Pilov 1975). Den plastiska formen innehåller mellan 35 och 90 % vatten. Bildningssättet var ett mysterium fram till 1958 då Caumartin hävdade att bergmjölk var resultatet av en biologisk process där bakterier stod för omvandlingen. Flera senare arbeten stödde denna teori, men under 1960 och 70-talet har andra undersökningar genomförts utan att någon biologisk aktivitet har kunnat påvisas. Sweeting (1972) anger att bergmjölk kan vara ett resultat av frostprocesser, men hon utesluter inte att biologisk aktivitet också kan ge upphov till bergmjölk.

Krål (1975) menar att ett vatten med hög halt av kalk i kombina-



Bild 35. Porös blomkålsliknande bergmjölk. Bilden tagen i ett numera avlägsnat takparti mellan Sal 5 och 6. De största förekomsterna av bergmjölk försvann därifrån när turistdelen av grottan byggdes ut 1979. Foto Mischa Gavrjusjov.



Bild 36. En mera tät och massiv bergmjölksbildning i Tunnelns tak. Denna bergmjölk kan enbart skiljas från flowstone genom mikroskopisk undersökning. Foto Mischa Gavrjusjov.

tion med snabb avsättning (kristallisation) ger bergmjölk som resultat. Detta styrkes av Bernasconi (1975) och av Roda & Rajman (1976). Vid dessa båda sistnämnda undersökningar har man dessutom funnit kolloidala lerpartiklar fästa på de långsmala kristallerna. Bernasconi anger att det är lerpartiklarna som binder vattnet i den våta bergmjölken. Roda & Rajman (1976), som undersökt bergmjölken i kemiska och spektrala emissionsanalyser samt i ljus och elektronmikroskop, förklarar att de inte klart kan ange genesen. Själva bildningsmekanismen är alltså fortfarande ett mysterium.

I Sverige är bergmjölk bara känt från Balsbergsgrottan (Tell 1967) och från en mindre fjällgrotta (Sjöberg 1980) samt från Lummelundagrottan. De två förstnämnda grottorna innehåller plastisk bergmjölk medan det i Lummelundagrottan enbart förekommer fasta avlagringar. Den uppträder där huvudsakligen som en oregelbunden vit blomkålsliknande massa och i mindre mån som flowstone och droppstenar. Bild 35 visar en typisk formation där texturen på nära håll är identisk med ytan på blomkål. Denna bildning är lätt och porös och består till 98 % av kalciumkarbonat, övriga 2 % löses ej av saltsyra. De största förekomsterna av denna typ finns i taket i de inre delarna av Sal 5, i högt belägna sprickor mellan Sal 5 och 6 samt i taket i Bergakungens sal och i Kapellet. Den andra typen av bergmjölk i Lummelundagrottan är något mera kompakt och uppträder som flowstone i anslutning till sprickor i tak och väggar. Bild 36 visar en förekomst i en nisch i taket i Tunneln.

SUBAKVATISKA BILDNINGAR

Namnet antyder att dessa speleothems har bildats under en vattenyta. Detta stämmer dock inte helt då två av de fyra former som ingår i gruppen bildas i själva vattenytan.

På kartan, fig.63, är de två enda förekomsterna av subakvatiska speleothems i grottan markerade. Det rör sig i båda fallen om gångar som dämpats upp av rimstonebildningar så att större vattenpölar har bildats. Bild 37 visar den uppdämda gången vid 5 i fig.63 under sensommaren när pölen är uttorkad (pölarne förefaller att vara uttorkade under sommarhalvåret). Den nedre bilden



Bild 37. En av rimestone uppdämd (för tillfället torrlagd) vattenbassäng med lilypads och subakvatiska knoppsinter. Bilden tagen i Lilypadgången. Foto Mischa Gavrjusjov.



Bild 38. Närbild av lilypads med subakvatiska knoppsinter där överdelen på de förstnämnda markerar vattenytans högsta nivå. Foto Mischa Gavrjusjov.

på samma sida är en närbild på de två former som bildas i bas-sängen. De knottriga popcornslika formationerna är bildade helt och hållet under vattenytan på samma sätt som de tidigare beskrivna grottkristallerna. Bildningen har inte något speciellt namn, visserligen benämner White (1976) och Moore & Sullivan (1978) dem grottpärlor men själv anser jag detta namn klart olämpligt. Det finns nämligen en annan form som kallas grottpärlor och de är oftast väl rundade och har ett sandkorn eller något liknande i centrum som kalciten har kristalliserat runt. Ett betydligt bättre namn anser jag akvatiska knoppsinter vara då detta namn säger att det är en knoppliknande mineralkonkretion som bildats under vatten.

Den andra större formen förefaller att vara något mera känd då den sedan lång tid tillbaka har ett eget namn, lily pads. Namnet beskriver här formationens utseende, den liknar övre delen av en utblommad lilja (personligen anser jag dock att formen mera påminner om en kantarell). Lily pads växer till i själva vattenytan och de växer då både på bredden och höjden. Detta gör att de smalnar av koniskt nedtill vilket inte syns särskilt bra på fotot då det växer ett ganska mäktigt lager knoppsinter på stjälkarna. Av fig.66 framgår det bättre hur de skall se ut och hur de förmodligen ser ut under knoppsintern.

Anledningen till att lily pads kan växa till på höjden är att vattenytan höjs kontinuerligt p g a att den travertindamm som spärrar av pölen växer till på höjden när vattnet sipprar över kanten på den. En sådan på höjden växande damm kallas för rimstone. Spärrar dammen av en större grottgång brukar den kallas för gour och gours kan bli flera meter höga.

De subakvatiska bildningarna uppkommer, liksom andra speleothems, när vattnet blir övermättat på kalk p g a att koldioxid avgår eller vattnet avdunstar. De uppdämda pölarna bildas företrädesvis där det redan från början finns en vattensamling i en svacka med så pass liten genomströmning att vattnet där hinner avge koldioxid och bli övermättat. Själva dammen bildas där vattnet som en tunn film rinner över kanten på pölen. Om travertin fortsätter att avlagras på andra sidan av dammen bildas där en sluttande flowstensbeläggning, detta är fallet i Lummelundagrottan vilket framgår i fig.66.

Hur lily pads bildas vet man inte i detalj men Hill (1976) tror

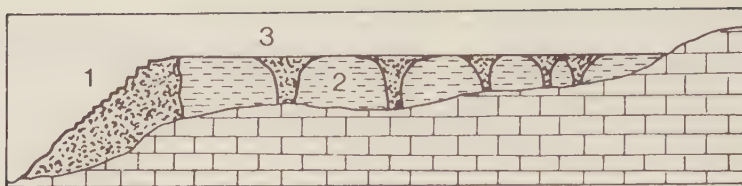


Fig.66 Rimstone (1) dämmer upp en vattensamling (2) i vilken lilypads (3) av kalcit växer. I takt med att rimstonen växer uppåt höjs vattenytan.

att de bildas genom kontinuerlig påväxt av vad hon kallar "cave rafts". Detta är kalcit som fälls ut i vattenytan som en tunn hinna. Hinnan är inte heltäckande utan flyter kring som mindre sjok på vattnet. Hill menar att dessa kalkflak fastnar på lily padsen och förser dem med material så att de kan växa i takt med att vattenytan höjs. Shelfstone är en liknande formation som växer som flak ut från stranden där de sitter fast. De växer också till i själva vattenytan och de bildas just genom cave rafts, Hill använder förresten de båda namnen synonymt. Men om lily padsen i Lummelundagrottan verkligen hade bildats av cave rafts borde det även finnas shelfstone vilket inte är fallet. När det gäller bildningen av rimstone och gours ansluter sig däremot Hill till den gängse teorin att de växer till genom direktutfällning p g a snabb CO_2 avgång när vattnet rinner över kanten. Om det förekommer cave rafts i pölen är det troligare att de kommer att avlagras vid kanten, detta har också konstaterats av Maximovich (1973).

TILLVÄXTHASTIGHETEN - SPELEOTHEMS SOM GEOLOGISKA KLOCKOR

I avsnittet om stalaktiter nämndes det att de förr åldersbestämdes via längden då man trodde att de växte med en bestämd hastighet. Så anger t ex Tell (1961) tillväxten i Lummelundagrottan till 1 mm/15-20 år. För att visa faran med sådana antaganden hänvisar jag till de över meterlånga och några 100 år gamla stalaktiterna från Helgeandsholmen. Jämförelsen är visserligen inte helt adekvat då speleothems bildade av utlöst cement förefaller att växa betydligt snabbare (Moore & Nicolas 1964), men även

undersökningar av tillväxthastigheten på stalaktiter i grottor har givit mycket skiftande resultat. Rent lokalt förefaller det emellertid som om längden på de hängande droppstenarna kan användas som åldersindikatorer. Franke & Gehy (1971) har t ex konstaterat att droppstenar i några centraleuropeiska grottor har växt ca 10 mm/100 år under postglacial tid (beräknad medeltemperatur 10°C) medan stalaktiter från den sista interglacialen enbart har växt 1 mm/100 år (beräknad medeltemperatur 5°C). Deras resultat baserar sig på radiometriska dateringar där de har analyserat segment av stenen medelst ^{14}C metoden. Bögli (1978) har sammanställt fyra andra ^{14}C dateringar där tre av dem har utförts på centraleuropeiska grottor. Resultaten där varierar mellan 8,7 mm och 42 mm/100 år. I USA har Harmon et. al. (1975) på samma sätt fått fram en tillväxthastighet på 1-5 mm/100 år och Bögli redovisar ett USA-värde på 6,4 mm.

En annan formation som utnyttjats i samma syfte är flowstone, men här har betydligt färre undersökningar genomförts. Gospodarić (1977) har i Postojnagrottan i Jugoslavien funnit att flowstonen där har ökat i mäktighet med 1 mm/100 år under Würminterglacialen. I Nordamerika har Harmon (1975) konstaterat en tillväxt på 0,15 mm/100år och i Labyrintgrottan i Sverige har jag själv funnit en avlagring som mellan år 19 000 BP och 10 000 BP ökade med i snitt 0,23 mm/100 år. Samtliga undersökningar har åldersbestämts med ^{14}C analyser, i det sistnämnda fallet genomfördes analysen vid ^{14}C -laboratoriet i Lund (prov Lu 1704 och Lu 1705). Av ovanstående framgår det att tillväxthastigheten varierar beroende på var travertinet har växt. Underlagsmaterialet är för litet för att medge några slutsatser om max- och minimigränser för de två formationerna, men tendensen visar på att stalaktiter ökar i längd med över 1 mm/100 år och flowstone med under 1 mm/100 år.

Under 1970-talet har intresset för radiometriska dateringar av speleothems ökat då metodiken har utvecklats till ett paleogeovetenskapligt redskap. Det är främst uran-thoriummetoden som användes, där förhållandet mellan ^{230}Th och ^{234}U anger åldern, men även andra isotoper i U-serien används. Metoden anses som tillförlitlig och tillåter dateringar inom perioden 2 000 år BP-350 000 år BP (^{14}C metoden är enbart användbar till ca 60 000 BP). När denna åldersdatering kombineras med bestämning av syreisotoper (Förhållandet $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ där den senare ökar i kallare klimat) kan den relativa temperaturen bestämmas för den tids-

period när travertinet avsattes, djupa karstgrottor är utmärkta för denna typ av temperaturbestämningar då de håller årets medeltemperatur, eller rättare sagt en medeltemperatur för "medelåret" under en längre tidsperiod (se kapitel 13).

Under det sista årtiondet har ett antal arbeten presenterats i USA där kalla och varma perioder under pleistocen (fyra glaciationer och mellanliggande interglacialer) har tidsavgränsats (se t ex Harmon 1978). I Europa har man inte hunnit lika långt, men i en sammanställning av Atkinsson (1978) finns en del tidsangivelser. Han anger bl a att dateringar från brittiska grottor pekar på att vi i Nordeuropa hade en interstadial för ca 60 000 år sedan och att den sista interglacialen var förlagd till tiden mellan 90 000 och 140 000 år BP.

Paleoklimatologiska tillämpningar är inte det enda som speleothems kan användas till. Atkinsson (1978) anser att minimiåldern på läget av tidigare grundvattenytor bör gå att fastställa och därmed minimiåldern på associerande landformer. Gospodaric (1977) anger att avbrutna speleothems kan användas till datering av tidigare jordbävningar. Spalding & Mathews (1972) liksom Harmon (1975) har fastställt pleistocena förändringar av havsytans nivå genom radiometriska dateringar av travertin i nuvarande undervattensgrottor.

Harmon (1974), Thompson et. al. (1974) och Atkinsson et. al. (1977) har samtliga funnit att speleothems inte tvcks växa under inlandsisar. Orsaken till detta har tolkats som att ett cirkulerande grundvatten inte har existerat under isen. Om denna tolkning är riktig finns här kanske svaret till den pågående debatten om huruvida inlandsisarna var fastfrusna vid underlaget eller ej, vilket i sin tur är av betydelse för frågan om hur stor den glaciala erosionen verkligen har varit. Ett noggrant studium av grottor och deras placering i terrängen i kombination med datering av speleosediment och speleothems kan kanske i framtiden bidra till svaret på den sistnämnda frågan.

En fråga som borde besvaras här är: Vilken ålder har travertinavlagringarna i Lummelundagrottan? Tyvärr kan jag inte ge något svar på den frågan. Visserligen har jag låtit ^{14}C datera tre prov från grottan, men dessa säger bara hur gamla de daterade proven är. De daterade avlagringarna, som varierade i ålder mellan ca 1 500 år och 3 600 år, diskuteras närmare i kapitlen 12 och 15.

12. LÖSA AVLAGRINGAR

Jord, sten, guano och gyttja är exempel på lösa avlagringar som förekommer i grottor. Gränsen mellan grottmineral och lösa avlagringar är flytande då vissa konsoliderade sediment kan räknas som grottmineral.

Avlagringarna kan härstamma från själva grottan (ras m m) eller ha transporterats in utifrån. Den senare gruppen är den som främst tilldragit sig forskarnas intresse. Detta beror på att många grottor utgör effektiva sedimentfällor och på att sedimenten kan bevaras intakta i grottor ostörda av erosionen i det omgivande landskapet. Detta är av särskilt intresse där inlandsisar har omformat landskapet.

Som exempel på olika slags forskning inom det speleosedimentologiska området kan Bull (1976) och Pribyl (1973) nämnas. Bull har under flera år studerat sediment i walesiska grottor. Hans studier har gett viktiga upplysningar om regionens paleoklimat och övriga miljöbetingelser vid sedimentens avsättning. Han anser sig även ha fått en god uppfattning om landskapsutvecklingen i stort. Pribyl har genom sina sedimentundersökningar rekonstruerat den kvartära utvecklingen i och kring karstgrottor i Tjecko-slovakien.

Vid denna typ av arbeten utnyttjas opåverkade sediment från de inre delarna av grottorna. Mera välkänt är kanske de arbeten som utförts i grottmyrningar i arkeologiskt syfte där sedimentstratigrafin utnyttjas vid dateringen. Det mest välkända exemplet i vårt land är från grottan Stora Förvar på Stora Karlsö där ett fyra m mäktigt kulturlager grävdes ut under 1890-talet. Bosättningen har daterats till mellan 3000 och 2000 f kr (Nilsson 1972).

Sediment i grottor kan ha mycket att ge framtida forskning inom olika fält. Collcutt (1977, 1979) hävdar i varje fall detta sam-

tidigt som han kritiserar de sätt på vilka studier för närvarande bedrivs och har bedrivits. Collcutt har förmodligen rätt i sina anklagelser, sedimentologin är ett ämne där en gedigen kännedom behövs för att erhålla maximal information ur avlagringarna. Lummelundagrottan innehåller rikliga mängder med sediment i ett stort antal olika lager som säkert innehåller åtskilligt med information om tidigare betingelser i dräneringsområdet. Tyvärr har jag misslyckats med att plocka fram denna information, dels p g a bristande kunskaper och dels för att en fullständig sådan utredning blir av en omfattning som kräver en egen avhandling. Arbetet med de lösa avlagringarna i grottan är alltså enbart att betrakta som påbörjat.

Det finns i den speleologiska litteraturen gott om förslag till systematisering av speleosediment, men då förhållandena i Lummelundagrottan är tämligen okomplicerade nöjer jag mig här med en praktisk indelning av förekommande avlagringar:

A. Alloktona: 1) minerogena, 2) organogena.

B. Autoktona: 1) rasmaterial, 2) residual (vittringsrester).

De autoktona avlagringarna härrör från grottan och utgöres av rasmaterial från väggar och tak samt av mindre lösliga partiklar (främst lera och fossil) som frigöres när den omgivande kalken löses upp. De alloktona sedimenten har antingen spolats ner med det rinnande vattnet via slukhål eller förts ner via trånga sprickor i berggrunden. Det har varit kutym att betrakta de flesta alloktona sediment i grottor som fluviatila, men 1977(b) bevisade Bull att stora mängder finkorniga sediment infiltreras ner i underjorden via till synes obetydliga sprickor.

I de två nästföljande avsnitten diskuteras vissa ackumulationer helt kortfattat. Sista avsnittet är en sammanställning av de lösa avlagringarnas utbredning i grottan samt en beskrivning av vissa anmärkningsvärda ackumulationer.

METODIK

Avlagringarnas utbredning har markerats på en grundkarta (fig.67). I mäktigare sedimentpackar har provgropar grävts där vertikala

snitt av lagerföljden har tagits med hjälp av kluvna tretums plaströr. I bassängerna har provproppar tagits med hjälp av hela plaströr av samma dimension (se bild 40). Djup och lagerföljder i övriga sediment har undersökts med sticksond.

Proverna har analyserats med avseende på sammansättning, kornstorleksfördelning, innehåll av pollen, diatoméer och makrofossil. Provtagningar och analyser har utförts av Rolf Engh, kvartärgeologiska institutionen i Göteborg.



Fig.67 Karta över Lummelundagrottan. Bokstäver och siffror markerar utbredningen av sediment i grottan.

ALLOKTONA AVLAGRINGAR

I texten anges de olika avlagringarna med bokstäver eller siffror, dessa hänvisar till läget i fig.67.

Sedimenten i mynningsgrottan har tidigare undersökts av Gislén & Brinck (1950). I deras redogörelse finns en detalj som avviker från vad vi iakttagit i de inre delarna av grottan. I mynningsgrottans bottensediment påträffade de små svarta klumpar av varierande storlek, som visade sig bestå av 36 % järn och små mängder Si, Al, Mn och Ca. Järnet förmodades vara utlöst ur de glaciflu-

viala depositionerna i Martebo myr och transporterat som $\text{Fe}(\text{OH})_2$ till sluken där luftningen i vattenfallen skulle ha oxiderat järnhydroxiden. Järnet skulle sedan ha fällts ut som järntrioxid. Det är fullt möjligt att denna teori stämmer då Stenner (1977) har påvisat att naturligt kalkrikt vatten tenderar att fälla ut tyngre metaller som Fe. Sådana järnutfällningar har dock inte påträffats längre in i grottan. Det är därför också möjligt att järnkonkretionerna kan ha samband med det järnbruk som i forna dagar låg medanför grottmynningen.

De alloktona sedimenten har tämligen ringa utbredning i den vattenförande delen av grottan. Generellt kan sägas att bassängerna har ett tunt bottenlager av finkorniga sediment som på vissa ställen är svagt dyblandade, men för övrigt uppträder sedimenten enbart som isolerade avlagringar. Vid punkt C (i fig.67) är grottan uppdelad i två gångar där den övre passagens golv är täckt med ca 70 cm lera. Denna typ av lerfyllnad förekommer annars enbart i Fossila Systemet. Vid F, G och I uppträder sandbankar i bakvattenlägen av det strömmande vattnet. G och I är märkliga såtillvida att de består av mulluskskal blandade med sand. Skalgrus från banken vid I har tidigare beskrivits av Åström (1976), examineringen av molluskerna utfördes då av H W Waldén vid Naturhistoriska muséet i Göteborg. Tabell 9 är en sammanställning av Waldéns analys och en dito utförd av Rolf Engh, 1978.

Tabell 9. Frekvensen av mollusker i skalgrusbankarna I och G i Lummelundagrottan. + = spår av, ++ = enstaka ex, +++ = riklig förekomst.

Sötvattensmollusker:	<i>Bithynia tentaculata</i> +++
	<i>Lymnaea stagnalis</i> +
	<i>Lymnaea palustris</i> +
	<i>Lymnaea</i> spp +++
	<i>Pisidium</i> sp ++
	<i>Planorbis planorbis</i> +++
	<i>Planorbis carinatus</i> ++
	<i>Theodexis fluviatilis</i> +++
	<i>Valvata piscinalis</i> +++
	<i>Valvata cristata</i> +++
Landmollusker	<i>Cochlicopa lubrica</i> ++
	<i>Pupilla muscorum</i> +
	<i>Vallonia puchella</i> ++



Bild 39. Sand varvad med gyttja i sedimentavlagringen vid punkten N i fig.46. Bilden vänd 90° åt vänster, spadskäftet skall stå lodrät. Foto Mischa Gavrjusjov.



Bild 40. Provtagning av sediment i vattenbassängerna med hjälp av plaströr. Foto Mischa Gavrjusjov.

Samtliga arter är vanligt förekommande på Gotland och ingen av dem är typiska för underjordisk miljö. De limiska molluskerna förekommer samtliga i Kanalen och har trogligen förts ner i systemet via slukhålén, då skalén är relativt lätta i förhållande till volymén bör de kunna passera förekommande sedimentationsfällor.

Vid punkt N finns en 1,1 m mäktig sedimentpacke som är tvärt avklippt av det strömmande vattnet. Fig.68:N visar lagerföljden i packen. I botten ligger ett 18 cm lerigt, gyttjigt sandlager (5 % organogent innehåll), över det 3 cm skalgrus (samma arter som i tabellen), 60 cm sand med rikligt innehåll av skal, 5 cm lerig, moig sand, 22 cm findetritusgyttja och överst 10 cm grovsand. Avlagringen diskuteras här då den är ytterst motsägelsefull. Gyttjelagret är inte homogent utan innehåller sliror och linser av sand (se bild 39). För att gyttjan skall sedimentera krävs ett nära nog stillastående vatten, men för att sanden skall transporteras genom systemet krävs en stark vattenström. Sifon 1,30 m uppströms avlagringen, är 5 m djup med en 45°-ig distalsida, det krävs alltså ett kraftigt strömmande vatten för att transportera den grova sanden (90 % grovsand enligt siktanalys) uppför slutningen.

Gyttja har påträffats på ytterligare två ställen i A.S och på sex platser i F.S. ¹⁴C dateringar av två prov gav följande resultat:

punkt N = 3530 $\pm$ 60 år BP (Lu 1512)

punkt 8 = 3570 $\pm$ 45 år BP (Lu 1511)

Gyttjan tycks alltså ha bildats för ca 3 500 år sedan i Martebo myr. I gyttjan har inga makrofossil påträffats, enbart pollen och spår av diatoméer. Av pollen har bara tall (pinus) och björk (betula) påträffats i 86 undersökta prov, i de prov som hämtats i minerogena lager återfanns inga pollen. Detta kan bero på att pollen förstörs om de ligger länge i speleosediment (Bastin 1977, Peterson 1976).

Det intressanta med denna sedimentpacke (N), förutom lagerföljden, är att den indikerar att vattenytan i denna del av grottan låg minst en meter högre för ca 3 500 år sedan. Grottan borde vid denna tidpunkt ha varit torrlagd till den nuvarande nivån i ca 1 000 år (se kapitel 15).

Längre in i grottan, vid P och mellan S - T, finns sediment-packar liknande den vid N. Egendomligt nog förekommer det knappt några sediment i de mellanliggande sjöarna, detta kunde undersökas när bassängerna torrlades 1978.

I Fossila Systemet är golvet nästan helt täckt av lösa avlagringar. Hitills har 39 sedimentackumulationer undersökts i detalj, lagerföljden i tio av dem är åskådliggjord i fig.68. Av figuren framgår det att inga av profilerna går att konnektera med varandra. Detta gäller för samtliga undersökta sediment-packar i hela grottan, 39 i F.S. och 26 i A.S.

Någon entydig förklaring till denna rikhaltiga variation i sammansättningen av sedimentlagerföljderna är svår att finna. Under förutsättning att samtliga lager är fluviatilt avsatta och har spolats ner i grottan via slukhål kan de olikartade sammansättningarna förklaras av växlingar mellan sedimentation och erosion. En annan möjlig förklaring är att sedimenten till vissa delar har förts ner i systemet via sprickor, och sederterat relativt lokalt beroende på låg vattenhastighet i gångarna. Något som talar för denna teori är att åtskilliga av de noterade ackumulationerna är belägna i anslutning till större sprickor eller mindre gångar som korsar huvudgången. Bild 41 visar en sådan mindre gång där sedimenten breder ut sig som en alluvialkon framför mynningen, bild 28 visar en liknande avlagring framför en spricka.

De enda sedimentlager som har en längre uthållighet är leravsättningarna. Bild 41 visar hur lera fyller upp en 1,3 m hög gång så att endast cirka 40 cm takhöjd återstår (i leran har en fluvial ränna bildats). Lera är dock den fraktion som har minst möjlighet att sedimentera i de trånga gångarna i F.S. med tanke på att vattnet där bör ha förflyttat sig relativt snabbt sedan slukhålen bildats. När lera väl sederterat är den dock betydligt mera erosionsbeständig än de grövre sedimenten vilket kanske utgör förklaring till att leran uppträder i uthålliga lager till skillnad mot övriga sediment. Detta resonemang stöder hypotesen om växlingar mellan erosion och deposition i gångsystemet.

På flera håll i F.S. förekommer det sediment som är varvade med travertinlager, t ex 68:14 och 68:31. Denna lagerföljd av-



Bild 41. Sediment som spolats ut från en mindre sidogång och avlagrats framför denna i den större korsande gången (18 - 19 i fig.46). Gångarna var helt vattenfyllda när detta skedde. I gropens övre del syns en lins av gyttja. Foto Rolf Engh.



Bild 42. Uthållig leravsättning som fyller ut 90 cm av gångens totala höjd på 130 cm (Lergången i F.S.). I leran har rinnande vatten eroderat ut en smal ränna. Foto Rolf Engh.

slöjar att grottan varit omväxlande torrlagd och vattenförande. ^{14}C datering av det översta och den undre lagret i skärningen vid 14 visade en åldersskillnad av cirka 2 300 år (1300 - 3570 BP, prov LU - 1701,02). Denna typ av lagerväxling har bara påträffats i de lägst belägna partierna vilket tyder på att vatten enbart nått en viss nivå i systemet. Kalcitlagrens mäktighet tyder på att översvämningarna inträffat med 100-tals års mellanrum. Detaljerade studier av samtliga dessa lagerföljder och jämförelser med borrhärdor från andra sedimentationsmiljöer på Gotland kan kanske ge svar på om det t ex rör sig om perioder med extrem nederbörd.

AUTOKTONA AVLAGRINGAR

De enda avlagringar som påvisats vara autoktona är rasmassor, mindre ansamlingar av lera och enstaka förkislade fossil. Volymmässigt utgöres dock över 50% av de lösa avlagringarna av rasmaterial.

De mest omfattande instörtningarna har skett i de delar där berggrunden utgöres av revkalk och krinoidécalc. Rasmaterialet består där av block större än cirka $0,3 \text{ m}^3$. Den största ansamlingen av block fanns i Sal 6 (se bild 23 och 24), men efter den senaste utbyggnaden är de avlägsnade.

I den lagrade kalkstenen är väggar och tak betydligt stabilare. Det är bara i de båda parallella gångarna mellan G och H i fig. 67 som taket störtat in. Bild 43 visar hur taket där släppt i stora sjok, i mitten av bilden är rasmassorna över 2,5 m mäktiga.

I Fossila Systemet döljs rasen för det mesta av finkorninga sediment, eller så är blocken varvade med sediment. Bild 44 visar ett parti mellan punkterna 7 och 4 där golv och tak har flyttats cirka två m uppåt p g a ras. Åtskilliga av gångarna i F.S. är omformade av instörtningar, hur detta gått till behandlas i kapitel 15.

I ett försök att få en minimidatering på ett av de större rasen i grottan bestämdes åldern på de äldsta delarna av bergmjölk som överlagrade ett nedstörtat block mellan Sal 5 och Sal 6. ^{14}C analysen gav en ålder på 3040 ± 55 år BP (Lu 1700), raset bör alltså ha inträffat före denna tidpunkt. Gissningsvis har



Bild 43. Ett stort parti av taket har släppt längs ett skiktplan. Bilden tagen från Torget mot N. Här finns de enda betydande instörtningarna som noterats i den lagrade kalken. Foto Mischa Gavrjusjov.



Bild 44. Denna gång har flyttats ca två m uppåt p g a att taket successivt rasat ner. Då rasmaterialet får större volym än fast berg fyller massorna ut nästan hela gången (mellan 7 och 4 i fig.46). Foto Mischa Gavrjusjov.

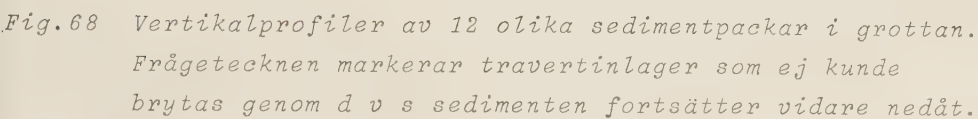
de flesta ras inträffat vid de tillfällena då de vattenfyllda gångarna tömts på vatten. Berggrunden som försvagas genom korrosion i det vattenfyllda stadiet utsätts nämligen för stor påfrestning när vattnets mottryck avlägsnas. De flesta rasen har inträffat längs ett märelskikt eller där en märellins legat inbakad i kalken.

De lösa avlagringarnas utbredning i grottan

Bokstäver och siffror hänvisar till läget i fig.67. P+D = pollen + diatoméanalys.

- A-B. Enstaka block. Ursprungligen fanns större ansamlingar men har avlägsnats.
- B. Lera och block.
- B-C. Anmärkningsvärda instörtningar som nu till största delen har avlägsnats (se kapitel 9).
- C-D. Block på botten, finkorniga sediment på och mellan blocken.
- D. 70 cm lera i en kryptgång över normalvattenytan. P+D, inga fynd.
- D-E. Block.
- E. Mäktig siltavlagring i smal sidogång.
- F. Siltbank i nisch.
- G. Smärre bank av sand med rikligt skalinnehåll: *Valvata cristata*, *Planorbis*, *Pisidium* vanligast förekommande (se tabell 9).
- F-H. Lera och block.
- H. I sidogångens högsta punkt 60 cm sed: Siltig lera med inslag av grovmo mot botten av packen.
- H-I. Gångens golv utgörs av rensplad kalkhäll, enstaka stenar vid sidorna.
- I. Lokal sed.ack., bank av grov- och mellansand, mycket kalkrik: se tabell 7.
- J. Block och lera i förbindelsegången.
- K. Mindre ack. i anslutning till sidotunnel, lera.
- K-L. Smärre ansamling av lera, salens botten blockfylld.
- M. Sjön nästan sedimentfri, mindre lerförekomst vid östra väggen.
- I-L. Tunt lager av mellansand.
- K-N. Smärre förekomster av finkorniga sediment nedanför korsande sprickor.
- N. Anmärkningsvärd sedimentpacke, se fig. 68:N. P+D, fragment av pennanta D, pinus + betula.
- O. Som ovan, se fig. 68:O.
- P. Ca 1 m mäktig sedimentpacke, lagerföljd ungefär som N.
- R. En ca 50 cm mäktig plattå av silt.
- S. En ca 4 m² och 90 cm mäktig siltavlagring.
- S-T. Sand varvad med silt och gyttja.
- U. Bank av sand och mo i vattenbrynet.
- V. Ca 40 cm mäktig bank av silt i vattenbrynet.

- 1-3. Över 1 m lera med linser av sand och grovmo. P+D från olika djup, inga fynd.
4. Övergång till grövre sed., siltig moig lera.
5. Sed.ack. i "övre salen", 75 cm mäktig, lera och grovmo. P+D, inga fynd.
6. Sed.ack. i "övre salen", se fig.68:6. P+D på grovmon och sanden, inga fynd.
- 5-7. Block och lera.
7. Se fig.68:7.
8. Se fig.68:8. P+D, fåtal pinus i gyttjan.
9. Se fig.68:9. P+D, fåtal pinus i gyttjan.
- 7-10. Block med mindre mängder lera.
- 10-11. Upp till 40 cm leriga sed. under travertin.
12. Mindre ack. av lerig sand.
- 11-18. Sporadiskt förekommande leriga-sandiga sed., delvis under travertin. Mäktiga avlagringar i sidotunnlarna.
- 13-15. Minerogen sedimentpacke av varierande mäktighet. P+D, inga fynd.
14. Se fig.68:14. P+D, enstaka pinus i gyttjan.
- 16-17. Gradvis ökad fyllnad av sand, fyller till slut hela gången.
- 18-19. Sedimentpacke som mot 19 fyller gången. P+D, enstaka pinus i gyttjan.
- 18-20. Travertintäckta block.
- 20-21. Över 50 cm lera.
- 21-24. Block.
- 21-40. Lera.
- 22-23. Lera och silt fyller gången.
- 24-27. Mäktiga lerlager, ytliga sandkappor på högre belägna partier.
- 27-28. Mäktig lera.
- 28-29. Block.
29. Se fig.68:29. Tydliga spår av erosion, tidigare överlagrade travertin hänger fritt från väggarna.
- 29-30. Över 100 cm mäktig sed.packe överlagrad av grovsand som vid N.
31. Se fig.68:31. P+D, inga fynd.
- 30-31. Lera av varierande mäktighet.
- 30-32. Sand och lera av varierande mäktighet.
- 31-34. Block.
33. Upp till 50 cm sandig silt.
- 34-36. Sporadiskt förekommande lera mellan block. Över 50 cm lera vid 35.
- 36-37. Block. Vid 37 över 60 cm lera med ytskikt av sand.
- 37-38. Upp till 45 cm lera.
- 38-39. Tunt lager av lera, närmare 38 övergång till lerig silt under travertin.



13. SPELEOKLIMAT

En grotta har ett speciellt klimat som markant skiljer sig från den yttre fria atmosfären. Detta gäller även grottor av ringa storlek. Temperatur, relativ luftfuktighet och luftrörelser är de faktorer som mest brukar beaktas i speleoklimatet. Även lufttrycket skiljer sig ofta från den fria atmosfären. Att nederbörden skiljer sig framstår som en självklarhet, men även om de allra flesta grottor är skyddade mot nederbörd förekommer det grottbildningar som inte är det och andra igen där nederbörd kan ackumuleras.

Generellt kan det sägas att grottor har ett jämnare klimat än omgivningen. Vissa grottor har t o m ett nära nog konstant klimat, dessa betecknas som statiska grottor.

Rousset (1967) anger i sin definition att en statistiskt grotta får ha en maximal årlig temperaturvariation på $0,5^{\circ}\text{C}$. Oeld (1923) anger i sin klassificering att en statisk grotta är en grotta med bara en öppning till den fria atmosfären. Roda (1973) som under många år arbetat med speleoklimat ansåg att det fanns behov av en exaktare definition av begreppet statisk grotta. Författaren och dennes kollegor har konstaterat att luftrörelserna i en grotta aldrig tycks upphöra helt. De föreslår därför följande definition på statistiskt grotta: De mikroklimatiska elementen i grottan, såväl de kemiska som de fysikaliska komponenterna av atmosfären, skall vara konstanta under en årscykel. D v s att den yttre meteorologiska situationen inte har någon inverkan alls. Det kan förefalla oväsentligt med en exakt definition, men inom biospeleologin och speleoterapin samt de laboratorier man inrättat i grottor eller artificiella bergrum finns ett behov av en klar definition.

Motsatsen till den statiska grottan är den dynamiska grottan. En dynamisk grotta har oftast mer än en öppning vilket under-

lättar cirkulation mellan yttre atmosfär och grottatmosfär. Oeld (1923) kallar en grotta med flera öppningar för dynamisk grotta och en grotta med en öppning för statisk grotta. Men Rodas definition ovan får nog anses vara den mest giltiga idag, d v s en grotta som uppfyller dennes villkor benämnes statisk oberoende av antalet öppningar.

Den dynamiska grottan uppvisar alltså påtagliga variationer i en eller flera av de i speleoklimatet ingående variablerna. Det finns dock ett mellanting mellan den statiska och den dynamiska grottan, nämligen den statodynamiska grottan. Någon giltig definition vad en statodynamisk grotta är finns tyvärr inte, men vad som avses är en grotta med ett stabilt klimat, dock inte så stabilt att den benämnes statisk. De fluktuationer som en eller flera av variablerna uppvisar är små i jämförelse med det yttre klimatet och förändringarna sker över längre tidsperioder. Lummelundagrottan är till största delen en statodynamisk grotta där klimatets förändringar beror på det genomrinnande vattnet, genomströmmande luft och turister.

Enligt Rodas definition bör de statiska grottorna enbart stå att finna bland de större grottorna eller hos grottor med mycket små eller spärrade ingångar d v s grottor där utbytet mellan det yttre och det inre klimatet är minimalt. Tyvärr förekommer det fortfarande i litteraturen att författare använder termen statisk i samband med grottor som har ett varierande klimat. Två ur klimatsynpunkt speciella typer av grottor med bara en öppning, den uppåtlutande grottan och den nedåtlutande grottan (s k säckgrotta), benämnes så sent som 1978, av den framstående karstforskaren prof. Bögli, som statiska. Dessa två typer av grottor ackumulerar varm- respektive kallluft enligt principen varm luft = lätt luft och kall = tyngre, se fig.69. Varm- resp. kallluftsfickorna i grottorna kan hålla relativt jämna temperaturer året runt, men just det faktum att luft utbytes med atmosfären gör att variationer förekommer. De kan därför inte benämnas statiska enligt Rodas definition. Säckgrottor är i detta sammanhang intressant för svenska förhållanden. De få äkta säckgrottor vi känner till i landet är i de flesta fall isgrottor, d v s de håller is året runt. En känd sådan grotta är Isgrottan vid skidbacken på Frösön, och en annan, nyutforskad sommaren 1979, är Isgrottan i Bjurälvens karstlandskap, NV Jämtland. Fig.70 visar en vertikalskiss av denna nära nog vertikala

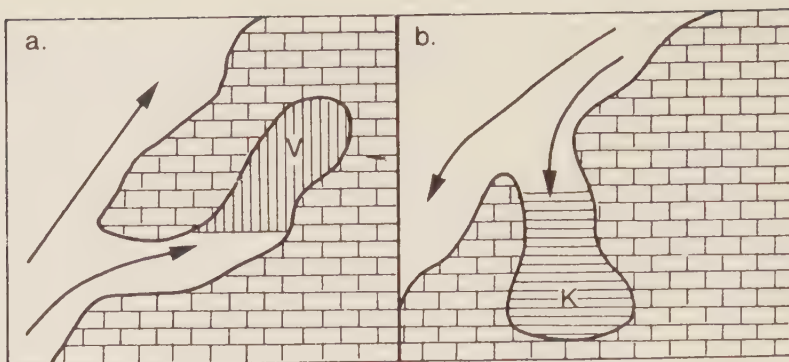


Fig. 69 I den uppåtriktade säckgrottan (a) kommer varmluft att ansamlas medan den nedåtriktade (b) ansamlar tyngre kall luft.

a) kommer därför att ha en högre medeltemperatur än omgivningen och b) en lägre.

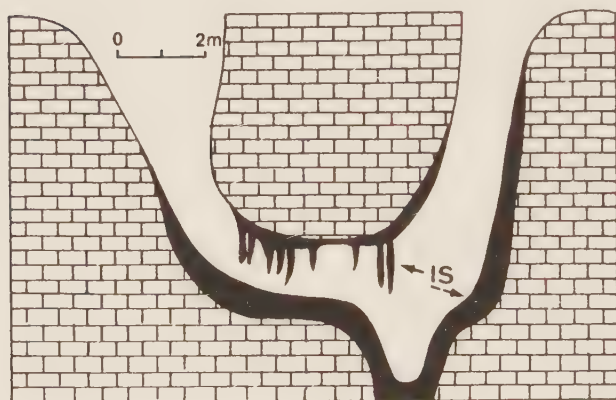


Fig. 70 Isgrottan vid Bjurälven har två ingångar. Större delen av året är nedre delen av grottan klädd med ett mäktigt ispansar p g a ansamlingen av kallluft.

grotta. Skissen visar hur grottan såg ut i början av augusti 1979. Vanligen är denna sorts grottor mer eller mindre snöfyllda under vintern, men vid ett besök i grottan i februari 1980 konstaterades att då så ej var fallet. Båda mynningarna var helt igen-snöade, men nere i grottan fanns ingen snö och isbeläggningen var delvis borta.

Avslutningsvis vill jag nämna att en statisk grotta har en konstant temperatur som ligger mycket nära årsmedeltemperaturen utanför grottan (Rousset 1967). Eventuella avvikelser beror på grottans djup och inflytande från den geotermiska värmen.

Speleoklimatets variationer i de dynamiska respektive statodynamiska grottorna beror främst på luftcirkulation (i sin tur beroende på grottöppningarnas antal, storlek och läge) samt på inverkan av eventuella genomflytande vattendrag.

MÄNNISKANS UTNYTTJANDE AV SPELEOKLIMATET

Att grottor har ett speciellt klimat har människan varit medveten om i 100 000-tals år då grottor ofta har varit centralpunkten i hennes liv. Så nämner t ex Kopper & Young (1976) att 95 % av alla humanoida fossil äldre än 30 000 år har påträffats i karstterräng trots att denna utgör mindre än 13 % av landytan. Även under senare tidsperioder tycks grottor haft stor betydelse. Enligt Straus (1979) har grottor varit den huvudsakliga källan för information om stenåldersbostäder i Euroasien och Afrika (till skillnad mot i den förstnämnda undersökningen framläggs här dock inga bevis för att förhållandet är reellt, d v s aspekter som att konserveringen av fossilen i grottor kan vara bättre eller att urvalet är felaktigt har ej beaktats).

Grottornas jämna klimat kan ha haft betydelse för människans existens i Europas tundraområden under senaste istiden. Arkeologiska utgrävningar av grottor och studiet av grottmålningar har i vart fall visat hur människans liv varit knutit till grottor i de södra och västra delarna av Europa mellan 35 000 - 10 000 BC (se bl a Kurtén 1969). Det tycks fortfarande finnas människor som bor i grottor för att klara vinterkylan. 1979 skriver Solecki om en grupp kurder, ca 45 personer, som med sina husdjur övervintrade från november till april i början av 1970-talet i Shanidar-grottan, Irak.

Den moderna människan använder huvudsakligen grottorna som turistmål och för speleosport. Men fortfarande utnyttjas vissa grottor till andra ändamål p g a deras speciella klimat. Av störst betydelse härvid är enligt Maximovich (1977) speleoterapi. Med speleoterapi menas att grottorna (även nerlagda saltgruvor användes i medicinskt syfte.

Det är känt att de nordamerikanska indianerna vid sjukdom flyttade in i vissa grottor för att fortare bli friska. Denna behandlingsmetod har sedan 1840 använts i USA även av den etablerade

läkarvetenskapen (Tell 1967b). I flera länder i Europa bl a Italien, Österrike och Ungern förekommer underjordiska behandlingsrum för olika sjukdomar. Baradlagrottan i Ungern är ett exempel med ca 100 bäddplatser installerade för astmasjuka patienter (Tell 1967b, Schulz 1952).

Vid diskussioner med svenska läkare har jag funnit att speleoterapi har ett dåligt rykte i Sverige. Anledningen förefaller att vara ett större försök med astmatiska patienter där sjukdomen försämrats av behandlingen. Trots detta tycks det främst vara luftvägssjukdomar som fortfarande behandlas med vistelse i speleoklimat. Positiva resultat av sådana behandlingar rapporterades både vid den 6:e och 7:e Internationella Speleologiska Kongressen samt den regionala Europeiska Kongressen i Sofia 1980, som exempel kan nämnas Palffy 1973 och Jenő 1977.

En ny faktor inom speleoterapi presenterades 1973 av Csekő. Undersökningar hade visat att vissa grottor är de mest ljudlösa platser som existerar i naturen. Han menade att detta är en betydelsefull kurerande faktor vid speleoterapi. En intressant sak i detta sammanhang är att de flesta människor upplever en längre tids väntan i grottor, med släckt belysning, som behagligt avslappnande. Ett känt fenomen är då att tiden tycks "gå fortare" 14 dagar upplevs t ex som en vecka (Priestly 1964). Detta märks särskilt hos de personer som i forsknings- eller rekordsyfte tillbringar flera månader i grottor (världsrekordet 1978 var 463 dygn i en jugoslavisk grotta enligt Guinness Book of Records). Grottor har, p g a sitt klimat, ofta används till svampodling, osttillverkning, lagring av mat och vin samt som lagerlokaler i största allmänhet (Maximovich 1977). Även Lummelundagrottans mynning har utnyttjats som "jordkällare" ända in på 1900-talet. Ett helt annorlunda bruk av speleoklimatet beskrevs 1972 av Russel. Han skrev om möjligheten att luftkonditionera hus med grottluft och tar upp ett lyckat exempel från USA vid sekelskiftet. Ett energialternativ av färskt datum är markvärme via värmepump - värmepumpad grottluft skulle ge mångdubbelt högre effekt. Tyvärr är detta inget att rekommendera då miljön i grottan förändras. Direktanvändning av grottluft är inte heller lämplig då grottluft ofta har en hög halt av Radon och Thorongas (Russel 1972).

Den konstanta miljön i en statisk grotta gör att den bl a kan användas som laboratorium. Detta enkla och billiga sätt att få

en konstant miljö utnyttjas också på flera håll i världen, som ett exempel kan nämnas laboratoriet i Han-Sur-Lesse grottorna i Belgien.

LUFTCIRKULATIONEN I LUMMELUNDAGROTTAN

En fullständig strömningsmodell för luftcirkulationen i grottan har inte gått att upprätta under den tid undersökningen pågätt. Detta skulle ha krävt kontinuerliga temperatur-, lufttrycks- och vindmätningar över flera årscyklar såväl i som utanför grottan. Men vissa konstateranden har gjorts och några generella samband har kunnat fastställas.

Luftströmmarnas hastighet har mätts med hjälp av varmtrådsanemometer, mätområde 0,5-10 m/s. Då apparaturen fungerade mindre tillfredsställande inne i grottan (eventuellt beroende på hög luftfuktighet) utnyttjades rök från cigaretter och gengaständstickor. Hastigheten kunde på så vis beräknas med hjälp av tidtagning av rökpulser längs en viss sträcka.

Mellan de två sprängda tunnlarna och grottans naturliga mynning uppträder ett markant luftdrag när tunnlarnas dörrar är öppna. Luftströmmarna varierar både i riktning och styrka beroende på den yttre temperaturen. Mest markant är luftdraget under varma sommardagar då varm luft strömmar ner i tunnlarna. Då tunnlarna enbart användes sommartid kommer luftströmmen huvudsakligen att vara riktad från tunnlarna mot grottmynningen. Vid temperaturer under 7°C eller vid kraftig östlig vind kan emellertid flödesriktningen vara den motsatta. Den södra tunneln skall från och med 1980 vara försedd med en extra dörr en bit in. Under förutsättning att båda dörrarna inte är öppna samtidigt kommer systemet att tjäna som en effektiv luftsluss varigenom luftcirkulationen blir minimal. Önskvärt är att även den äldre tunneln förses med en extra dörr.

I den delen av grottan som ligger innanför visningsdelen är det främst i Fossila Systemet som distinkta luftströmmar har konstaterats. Vindar på upp till 2,5 m/s har noterats. Vid vissa tillfällen är vindarna relativt konstanta i styrka medan de vid andra tillfällen kan variera i såväl styrka som riktning. Vindriktningen

kan t o m ändras inom loppet av bara några minuter.

I Aktiva Systemet innanför visningsdelen har luft rörelser enbart påvisats i den trånga passagen vid Lerhamnen och på de ställen där Fossila Systemet mynnar i det Aktiva. I det parti av huvudgången som frilades vid länspumpningen 1978 konstaterades luftdrag från en spricka, platsen är markerad i fig.44.

Förutom vid de tre ovan nämnda öppningarna till grottan uppträder luftströmning i den s k Klafvers spricka (E i fig.4). Som mest har en uppåtgående luftström på 3,4 m/s konstaterats vid utomhus-temperatur på -12°C . Den kraftigaste nedåtgående luftströmmen hade en hastighet på 1,5 m/s vid en utomhustemperatur på 18°C . Vindar av stabil riktning och styrka förefaller att uppträda i grottan vid de tillfällena då temperaturen i den fria atmosfären markant över eller underskrider 7°C . Vid kall väderlek strömmar den ca 7°C varma grottluften ut genom Klafvers spricka och andra eventuella taköppningar. Ny luft tillförs då genom grottans lägre belägna mynning. Vid väderlek med temperaturer över 7°C är förloppet det motsatta. Denna typ av luftströmmar kallas för termodynamiska vindar, de har studerats i detalj av bl a Benedict 1977.

I Klafvers spricka har jag konstaterat att den uppåtriktade luftströmmen vid kall väderlek förefaller att vara kraftigare än den nedåtgående vid varm väderlek. D v s den uppåtriktade luftströmmen är snabbare vid t ex 0° än vad den nedåtriktade är vid 14° . Detta är tydligen inget ovanligt i samband med grottor som är förbundna med den fria atmosfären genom vertikala schakt enligt Baldwin (1975), han benämner fenomenet skorstenseffekten.

Luftströmmar av varierande styrka och riktning och med perioder av vindstilla benämnes av Bukovinsky (1966) för kmitors. De uppkommer, säger Bukovinsky, när vindar i den fria atmosfären blåser med oregelbunden styrka mot grottöppningar. Lufttrycket i grottan kommer då att variera i takt med vinden och ge upphov till luftpulser genom grottsystemet. Dubljanski & Sockova (1977) säger emellertid: "I komplexa labyrintgrottor, sammanbundna med ytan genom smala schakt, finner man oregelbundna pulsar av luft som varierar i hastighet och riktning". Hon benämner dessa luftströmmar spelean breath. Till skillnad mot Aktiva Systemet är Fossila Systemet labyrintartat uppbyggt och dessutom troligen förbundet med ytan via trånga schakt (Klafvers

spricka och ev. slukhål). Tyvärr anger Dubljanski inte hur dessa vindar uppkommer eller varför de enbart uppträder i labyrintgrottor. Trots detta finner jag Dubljanskis påstående mera tillämpbart i Lummelundagrottan än Bukovinskys då vindarna i Fossila Systemet inte har kunnat korreleras med vindar i Aktiva Systemet. Andra faktorer som kan ge upphov till luftströmmar i grottsystem är, förutom temperaturdifferenser mellan grottatmosfären och ytteratmosfären och påverkan av vindar i ytteratmosfären, skillnader i luftens specifika vikt p g a olika luftfuktighet (Dubljanski & Sockova 1977) och/eller olika CO_2 -halt (Bögli 1978), ett rinnande vatten genom grottan (termisk och mekanisk påverkan, Bögli 1978) och lufttrycksförändringar i den fria atmosfären (Bögli 1978).

Lufttrycket i grottan, som har ett klart samband med luftströmningen (Bögli 1978), har ej undersökts i detalj. De enstaka punktmätningar som utförts, visar att lufttrycket i grottan tenderar att vara något högre i grottan än i den fria atmosfären. 1955 konstaterade Tell samma förhållande i grottans yttre delar och Åkerman (1972) har noterat samma sak i Balsbergsgrottan.

LUFTFUKTIGHETEN

Den relativa luftfuktigheten (rh) i grottor är betydligt högre och mera konstant än i den fria atmosfären. Bögli (1978) anger som en generell regel att rh i grottor ligger mellan 90% och 100%.

Luftfuktigheten i Lummelundagrottan mättes dels kontinuerligt med vissa avbrott på sju ställen mellan den 7.5 och den 11.11 1977 och dels genom punktmätningar vid besök i de olika delarna av grottan fram t o m 1979. Härvid användes en mindre hårhygrometer med en mätnoggrannhet av $\pm 3\%$. Vid de förstnämnda mätningarna användes sju st termohygrografer av SMHI:s modell med en mätnoggrannhet av $\pm 3\%$. Instrumenten var inställda på veckodrift och registrerade luftfuktigheten på ett speciellt registreringspapper (se fig.72). Hygrometrarna kalibrerades till 100% genom att lägga hårharporna i destillerat vatten i en timma.

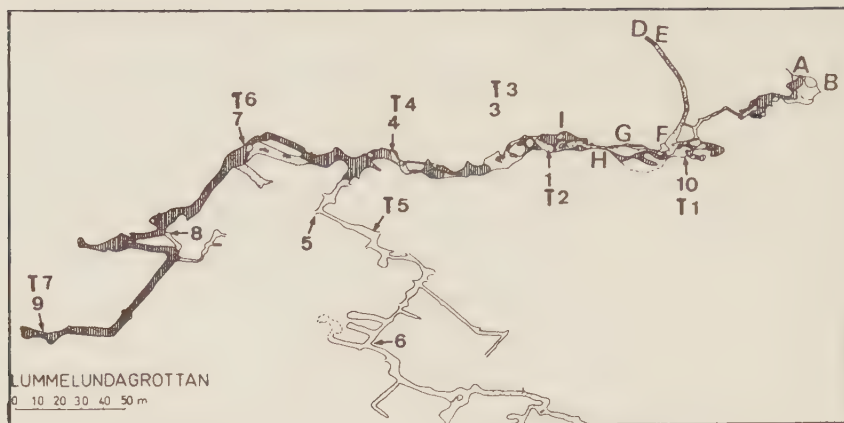


Fig. 71 Karta över Lummelundagrottan utvisande placering av max - min. termometrar (1-10) samt termohygrografer (T1-T7).

Termohygrografernas placering i grottan framgår av fig. 71 där instrumentens läge markerats med beteckningarna T1 - T7. Under vintern 1977-78 stod termohygrograferna T1 och T3 kvar i grottan, men registreringspappren byttes diskontinuerligt under denna period.

Samtliga utförda mätningar och registreringar visar att den relativa luftfuktigheten (rh) aldrig understeg 95% utom i mynningsgrottan utanför den i fig. 75 markerade grinden. Detta förhållande är annorludna än det förväntade resultatet. Andersson & Gusting (1962) fann vid mätningar i august 1962 att rh låg mellan 90,5% och 92% i visningsdelen av grottan. De anger dock inte om instrumenten var kalibrerade varför instrumentfel kan ha förekommit. Lysenko (1975) beskriver en turistgrotta där rh sjönk med 10 % när en besöksgrupp vistades i grottan. Han anser att rh i grottan under turistsäsongen varierade mellan 65 och 95 %. Det var därför väntat att visningsdelen av grottan skulle uppvisa variationer i luftfuktighet under sommaren. Instrumenten som var placerade i denna del av grottan uppvisar som mest 4 % variation under hela tiden. Dessa förändringar, mellan 96 och 100 % skedde dessutom över längre tidsperioder. De maximala förändringarna under dygnet uppgick som mest till 1,5 %. Den relativa luftfuktigheten i de inre delarna av grottan tycks ligga relativt konstant mellan 97 och 100 % och fluktuationerna

inom dessa gränser sker långsamt. För det mesta går de inte att spåra under en veckoregistrering, men ett undantag fanns. T7 som var placerad strax över vattenytan vid vattenlåset i Sifonsalen, registrerade relativt snabba förändringar vid flera tillfällen sommaren 1977. De största fluktuationerna registrerades under perioden 20/6 - 27/6 (se fig.72). Rh varierade då mellan 95 och 98 % (lägst uppmätt värde). Variationerna under denna period kan också spåras i T4, T3 och T6 men i betydligt mindre utsträckning. Ett samband tycks föreligga mellan fluktuationernas storlek och avståndet till det rinnande vattnet. T7 var placerad 0,3 m över vattenytan i strömfåran. T4 och T6 var placerade ca 1 m från vattnet och T3, som gav minst utslag (enbart den första och kraftigaste fluktuationen i fig.72 blev här registrerad som en svag störning mindre än 0,5 %) var placerad 4 m från vattnet. Det är möjligt att detta samband enbart är en slump då den samtidigt registrerade temperaturen inte visar någon förändring alls. Under denna period var yttertemperaturen högre än normalt. Lufttryck, nederbörd och vind uppvisar däremot inga anomalier. Det faktum att instrumenten längst ut i grottan inte visar några variationer under denna period gör att fluktuationerna i de innanför belägna instrumenten förmodligen inte har något direkt samband med det yttre klimatet.

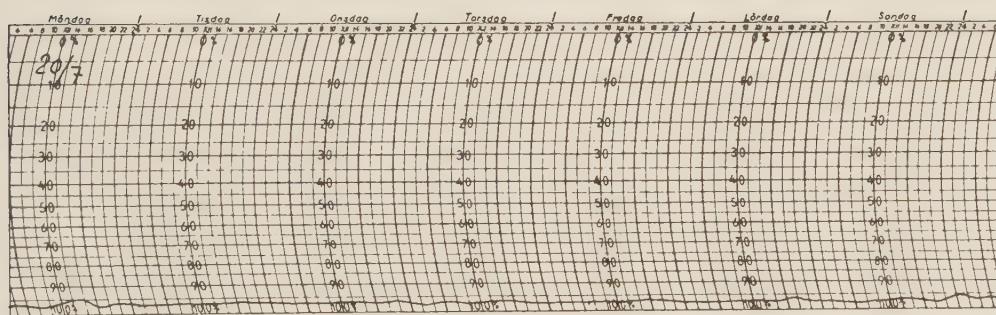


Fig.72 Registrering av den relativa luftfuktigheten vid T7 mellan den 20/6 och 27/6 1977. Var horisontell linje = 5 % rh.

Nu är det inte ovanligt att grottor uppvisar variationer i den relativa luftfuktigheten med oregelbundna intervall enligt Pulina (1960) och Quitt (1965). De anger att någon tillfredsställande förklaring till fenomenet inte är känd.

De minsta variationerna uppvisade termohygrograf T5, som var uppställd i Fossila Systemet. Samtliga registreringar visar på 100% utom under vecka 24 då värdet 96% registrerades. Det är dock inte uteslutet att denna avvikande registrering kan bero på instrumentfel. Notabelt är att detta instrument befann sig längst bort från vattnet, som rinner genom grottan, och samtidigt uppvisande det högsta och mest stabila värdet på rh.

TEMPERATUREN

De sju ovan, nämnda termohygrograferna var utrustade med bimetallstermometrar, noggrannhet $0,5^{\circ}\text{C}$, anslutna till skrivare med veckodrift. Dessa var i drift mellan den 7/5 och 11/11 1977. T1 och T3 var dessutom i diskontinuerlig drift fram till den 14/7 1978. I fig.71 är läget för tio st maximum-minimum termometrar markerade med siffrorna 1-10. Termometrarna placerades ut den 5/7 1977 och togs in den 14/7 1978, utom nr 5, 8 och 10 som var kvar till den 12/7 1979. Termometrarna har en noggrannhet på $0,5^{\circ}\text{C}$.

Vid upprättandet av temperaturprofiler i visningsdelen och mynningsgrottan användes en strålskyddad termistor kopplad till en kordinatskrivare av märket Minigor. Mätnoggrannhet $0,1^{\circ}\text{C}$. Samtliga instrument kalibrerades mot en precisionstermometer, noggrannhet $0,1^{\circ}\text{C}$.

Erhållna värden från termometrarna redovisas i tabell 10. Tabellen visar högsta och lägsta temperatur under sommaren 1977, 7/5-11/11, samt under vintern 1977, 11/11-26/3.

Under sommarperioden var termometrarana 1, 4, 7, 9 och 10 placerade tillsammans med termohygrografen. Registreringarna från dessa visar att de högsta temperturvärdena uppnåddes i slutet av juli och att förekommande temperaturförändringar hade skett långsamt över en period på flera dagar. Undantag från det senare är dock registreringen från T1.

Tabell 10. Max A och Min A = högsta respektive lägsta temperatur under sommaren 1977, 7/5-11/11. Max B och Min B = högsta respektive lägsta temperatur under vintern 1977-78, 11/11 - 26/3.

Termometer nr	Max A	Min A	Max B	Min B
1	8,5	7,0	7,0	5,0
2	9,0	7,5	7,5	4,0
3	7,5	7,5	7,5	7,0
4	7,5	6,5	6,5	4,5
5	6,5	5,0	5,0	4,5
6	5,5	5,0	5,0	3,5
7	7,5	7,0	7,0	3,5
8	8,0	7,0	7,0	4,0
9	8,0	7,0	7,0	3,5
10	10,5	7,0	7,0	5,5

Termometer 3, som var upphängd i taket i Sal 6, visade en konstant temperatur av 7,5°C under hela sommaren. Termometer 2, som var placerad rakt under nr 3 (0,1 m från vattenytan), uppvisade däremot den största skillnaden mellan högsta och lägsta temperatur i grottan innanför visningsdelen. Orsaken till den högre temperaturen är förmodligen närheten till det rinnande vattnet. Generellt har de instrument, som varit placerade närmast vattnet, visat de högsta temperaturerna.

De instrument, som var placerade i Fossila Systemet, visade de klart lägsta temperaturerna under sommaren, 5,0 - 6,5°C. De låga värdena är något svårförklarliga, men det kan vara så att när grottan vintertid kyls ner av det då rikligt flödande vattnet påverkas även denna del av grottan. Den ringa mängd varmt vatten, som strömmar genom grottan sommartid, förmår sedan inte tillföra grottan tillräckligt med värme så att även Fossila Systemet påverkas. Termometer 3 visar ju att vattnets uppvärmande effekt inte når så långt.

Temperaturerna under vinterperioden var något lägre än förväntat. Men återigen är det vattnets temperatur som påverkar den närmaste

omgivningen. De lägsta värdena har registrerats av de instrument som varit placerade närmast vattnet, därnäst kommer de som varit lågt placerade men på avstånd från vattnet. De högsta minimitemperaturerna har registrerats av de termometrar som varit placerade på hög höjd i grottan. Termometer 3, som satt i taket, uppvisar en variation under hela året på bara $0,5^{\circ}\text{C}$ vilket är egendomligt med tanke på att den av vattnet uppvärmda luften borde stiga uppåt.

Termometer 5 i Fossila Systemet visar att det där vintertid blir ungefär 1° kallare medan nr 6 visar på en temperaturskillnad på 3° . Troligen är det också här vattnet som åstadkommit den låga temperaturen, vintern 1978 visade det sig nämligen att vatten rinner fram i den delen av grottan under högvatten.

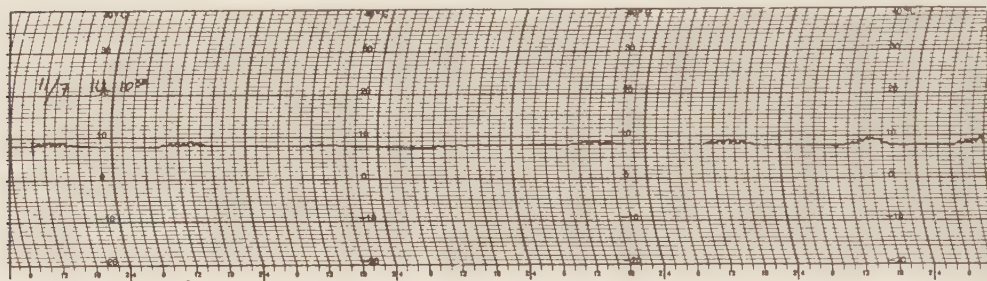


Fig. 73 Registrering av temperaturen vid T1 mellan den 11/7 och 18/7 1977. Var horisontell linje = 1°C .

Den största uppmätta temperaturvariationen i grottan, 5°C , härstammar från den termometer, nr 2, som varit placerad närmast vattnet medan den minsta variationen kommer från det instrument som befunnit sig på den högsta höjden över vattnet (möjligheten finns att de lägst placerade termometrarna varit i direkt kontakt med vattnet trots att de under vintern flyttats upp cirka 1 m för att undvika detta). Frånsett dessa extremfall verkar det som om grottan innanför visningsdelen, från juli 1977 till juli 1978, hade en temperaturvariation på $3,5^{\circ}\text{C}$. Detta resultat kan jämföras med en undersökning av grottor, genomflutna av vattendrag, i Tjeckoslovakien. Quitt (1965) har där påvisat temperaturfluktuationer på 5°C .

Visningsdelen av Lummelundagrottan har vintertid samma temperaturvariationer som resten av grottans aktiva del. Sommartid är situationen emellertid en annan utom i det golvnära luftskiktet. Termometer 10 och T1 visar på en temperaturvariation av bara $3,5^{\circ}\text{C}$ under hela sommaren. Dessa två instrument var placerade i den yttre delen av grottan mellan den naturliga mynningen och ingångstunneln. Termografens registreringar visar att små snabba temperaturfluktuationer har förekommit vissa dagar. Dessa uppträdde första gången den 13/5 på eftermiddagen med en variation på $0,5^{\circ}\text{C}$. Fig.73 visar en registrering från den 11/7 till den 17/7 1977. Temperaturväxlingarna uppgår under denna period till maximalt 2°C och de förekommer mellan kl 10 och 18 på dagen. Temperaturkurvan avspeglar förmodligen den luftcirkulation som uppträder mellan ingångstunneln och grottans naturliga mynning under visningstiden. I den inre delen av grottans visningsdel, Sal 5, märktes inget av dessa fluktuationer. Den högsta uppmätta temperaturen var här $8,5^{\circ}\text{C}$ vilket var ett förvånansvärt lågt värde med tanke på att ca 90 000 personer passerade genom denna sal under sommaren.

Mätningar på två meters höjd över golvet visar emellertid på ett annat förhållande. Fig.74 visar temperaturprofiler dragna från den norra tunnelmynningen (D) in till Sal 5 (I). Bokstäverna i figuren hänvisar till i fig.71 markerade punkter längs mätprofilen. Den övre delen av fig.74 visar temperaturprofiler uppmätta på två m höjd över golvet, medan den undre delen av figuren utgöres av profiler uppmätta i golvnivå. Mätningarna är utförda vid tre skilda tidpunkter på dagen, på morgonen innan grottan öppnades för visning, mitt på dagen och på kvällen efter den sista besöksgruppen.

Den undre figuren visar att temperaturen vid golvnivå är i stort sett opåverkad, det är enbart i den sprängda tunneln som en temperaturhöjning förekommer. På två meters höjd kan en påverkan från yttemperaturen spåras ända in till H, mellan Kapellet och Sal 5. Dessutom har på denna nivå en förhöjning av temperaturen skett under dagen. Temperaturökningen, från $7,5$ till $8,7^{\circ}\text{C}$, uppträder i hela visningsdelen. Detta värmetillskott bör komma från besöksgrupperna och från belysningen. Om var besökare avger ca 150 W och stannar i 20 minuter tillföres grottan ca 50 kWh per dag med 1 000 besökare. Belysningen avger ca 30 kWh/dag under högsäsong.

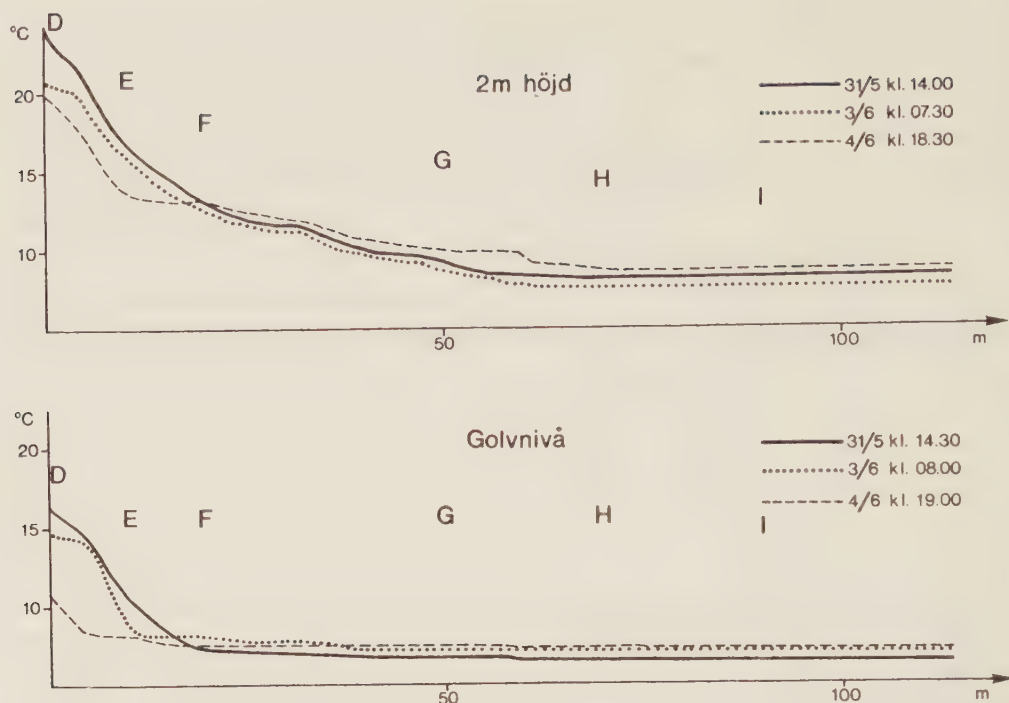


Fig. 74 Temperaturprofiler från den norra tunnelns mynning ner i grottans visningsdel. Bokstäverna anger läge i fig. 71. Profilerna är utförda vid tre olika tillfällena och på två olika nivåer.

I kapellet finns högst upp i taket en nisch, med vackra kalcitutfällningar, som tidigare utgjorde en varmluftsicka. Kalcitutfällningarna belystes sommaren 1977 med lampor på sammanlagt 1,6 kW och värmen från lamporna ansamlades i nischen. Den högsta temperatur som uppmättes var $18,5^{\circ}\text{C}$ när belysningen varit påslagen i fem timmar. Belysningen har nu ändrats om och minskats vilket gör att sådana extremtemperaturer förhoppningsvis inte kommer att uppträda fler gånger. Hög temperatur och belysning gör att kalcitutfällningarna "dör" (se vidare i kap. Speleothems) och blir bevuxna med mossor och lav.

Sammanfattningsvis kan sägas att turistverksamheten under 1977 och 1978 hade relativt liten påverkan på temperaturen i grottan, som mest har på 1,7 m höjd en temperaturhöjning på $2,9^{\circ}\text{C}$ noterats under högsäsongen i juli 1977. Luftväxlingen via tunnarna

kan däremot påverka temperaturen i grottan varför luftslussar snarast bör monteras in.

För att undersöka hur luftgenomströmningen och besöksgrupperna samt det yttre klimatet påverkade grottans yttre partier genomfördes noggranna temperaturmätningar i mynningsgrottan under dagtid när yttertemperaturen var cirka 18°C . Fig.75 är en skiss över mynningsgrottan, kallad Linnés Grotta, och mätprofilerna i densamma. Profil 1-4, uppmätt på 0,1 och 0,7 m höjd vid tre skilda tillfällen, visar att grottan ca nio meter innanför mynningen var opåverkad av den yttre temperaturen och att den utströmmande luften där höll $7,5^{\circ}\text{C}$ - den verkade alltså inte att vara påverkad av den något högre temperaturen i visningsdelen. Figur 76 visar också ett oväntat resultat, grottatmosfären påverkade temperaturen i den fria atmosfären ända till ca 10 m utanför grottmynningen. Den utströmmande kallluften var mest framträdande i det marknära skiktet vilket framgår av skillnaderna i temperaturprofilernas utseende i figurerna 76a och b.

I skärningen mellan profilerna 1-4 och 5-6, 3,5 m innanför mynningen mättes temperaturen i vertikalled. Fig.77 visar resultaten från tre olika mättillfällen. Anmärkningsvärd är den relativt konstanta temperatur luften har upp till ca 0,1 m över vattenytan. På samma sätt tycks berggrunden i taket påverka temperaturen.

De heldragna profilerna i fig.78 är utförda på 0,7 m höjd över golvnivå. 5-6 visar att temperaturen tvärs mynningen på denna nivå är relativt konstant (störningen i kurvan beror på ett större stenblock).

Samtliga ovan nämnda temperaturprofiler baserar sig på mätningar utförda med termistor och minigorskrivare under tre dygn på försommaren 1978. Punktmätningar utförda med termistor och Normameter vid nio tillfällen under somrarna 1977-79 visar att kurvorna kan vara representativa för varma dagar med låg vindhastighet. Desto starkare vindarna är vid grottmynningen desto kortare sträcka verkar den kallare grottluften att kunna spåras framför mynningen. Även inne i grottan påverkas temperaturprofilerna av vinden.

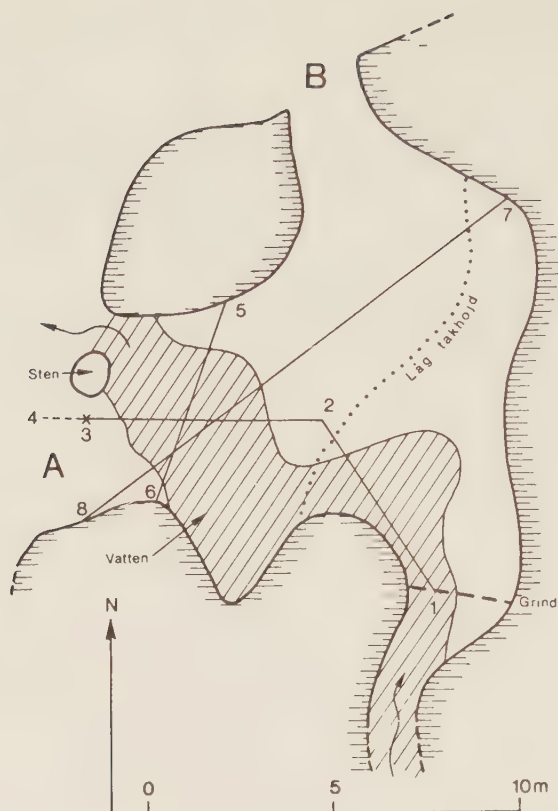


Fig. 75 Skiss av Lumme-lundagrottans naturliga mynning med tre olika profillinjer inlagda.

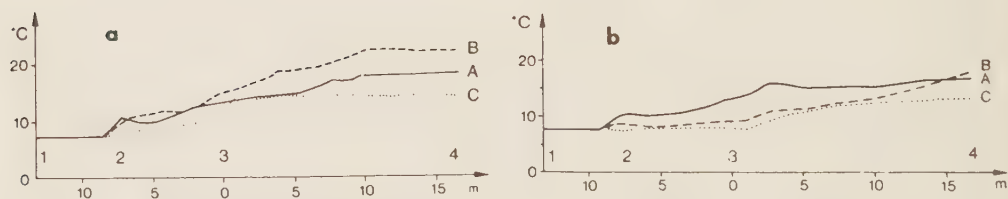


Fig. 76 Temperaturprofil 1-4 (enligt fig. 75) där a) är utförd 0,7 m över marken och b) 0,1 m över marken. A = den 30/5 kl. 12, B = den 2/6 kl. 15, C = den 4/6 kl. 01, samtliga år 1978.

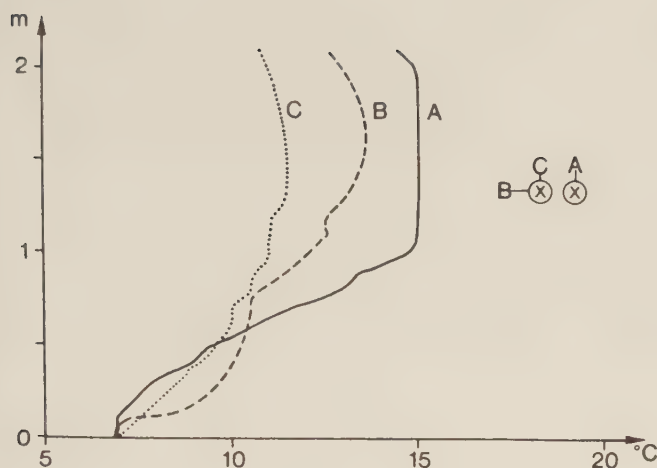


Fig. 77 Vertikal temperaturprofil utförd vid 3 i fig. 75. X=temperaturen utanför grottan vid resp. mättillfälle. A = den 31/5 kl.13, B = den 2/6 kl.16, C = den 4/6 kl.02, samtliga år 1978.

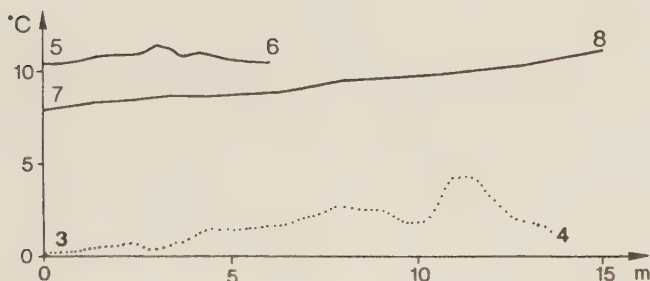


Fig. 78 Temperaturprofilerna 5-6, 7-8 och 3-4 enligt fig. 75. De två övre utförda den 31/5 kl.12, 1978 på 0,7 m höjd. Den undre uppmättes den 9/3 1980 på 0,7 m höjd.

Vid kall väderlek (under 7°C) är situationen helt annorlunda. Mätningar vid sex olika tillfällen vintertid har visat att några generella kurvor inte tycks gå att upprätta för intervallet -8 till $+7^{\circ}\text{C}$. Den nedre punkterade kurvan i fig. 78 visar en situation i mars 1980 när utomhustemperaturen var 0°C . Kurvan visar att det är varmare inne i grottan än utanför, men detta är ingen generell regel vintertid. Vid flera tillfällen har grottan varit betydligt kallare än den yttre atmosfären. Oregelbundenheten i kurvan är däremot tämligen representativ, men oregelbundenheten tycks inte följa något bestämt mönster. Varför det förekommer luftmassor med olika temperaturer inne i grottan kan jag tyvärr inte förklara.

Några termistormätningar i grottan när yttertemperaturen understigit -8°C , har inte genomförts. Utplacerade max-mintermometrar har emellertid visat att temperaturen vid punkt 7 inte varit lägre än -6°C och strax innanför punkt 1 inte varit lägre än -1°C trots att yttertemperaturen varit så låg som -18°C . Profil-mätningar vid så låg temperatur skulle förmodligen ge en mot mynningen brant lutande kurva då temperaturen där varit lika med yttertemperaturen enligt en på stenen placerad termometer (stenen markerad i fig.75).

Vertikalprofiler uppmätta i grottmynningen (vid korsningen mellan profilerna 5-6 och 7-8) under lägre temperaturer uppvisar inga enhetliga drag annat än att vattnet avger värme till det ytnära luftskiktet. Det taknära skiktet verkar också att vara varmare än mellanskiktet, främst under hösten och senare bara vid sträng kyla. Detta beror på att bergytan kyles ner efterhand så att det taknära luftskiktet, under en senvinterdag med temperatur över fryspunkten, kan ligga under fryspunkten. Detta illustreras bäst av det faktum att tak och väggar under senvintern brukar vara vackert draperade med stora droppstenar av is, bildade av vatten som sipprar fram ur sprickor i berget.

Ovanstående kan sammanfattas med att mynningsgrottans klimat inte påverkas nämnvärt av yttertemperaturen sommartid, inte heller kan någon påverkan från turistvisningarna spåras där. Vintertid verkar det emellertid som om luftutbytet med den yttre atmosfären är större och att temperaturen i grottan påverkas mera. Detta förhållande förstärkes genom att luftströmmen är riktad ut ur grottan under sommaren och in i grottan under vintern.

SAMMANFATTNING ÖVER LUMMELUNDAGROTTANS KLIMAT

Fig.79 är en schematisk bild över grottan, från den punkt där vattnet försvinner under jord till där det rinner ut ur grottan. I nedanstående resonemang delas grottan upp i olika avsnitt med hjälp av bokstäverna i figuren.

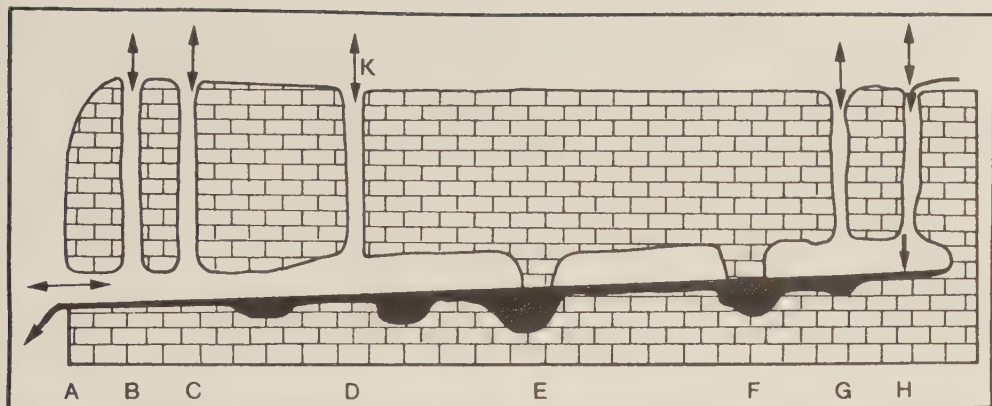


Fig. 79 Schematiskt längdsnitt genom hela Lummelundagrottan. A = mynningen, B och C = de sprängda tunnlar, E och F = sifoner (flera finnes), G och H = slukhål (flera finnes). Pilarna visar hur luften rör sig ut och in i systemet. Svart markerar vatten.

Den största luftgenomströmningen i grottan sker sannolikt mellan ingångstunnel B och mynningen A. I samband med detta påverkas temperaturen cirka 40 m in i grottans visningsdel.

Något större luftutbyte mellan utgångstunnel C och A bör inte ske sedan luftslussen monterats.

En viss luftcirkulation mellan Klafvers spricka (K), via Fossila Systemet, och A sker förmodligen.

Mellan D och Sifon 1 (vattenlåset E) bör luftväxlingen vara liten då denna del av grottan inte tycks ha någon öppen förbindelse till ovanför liggande markyta.

Luftcirkulationen mellan sifonerna E och F (fyra sifoner är kända, men flera finns troligen) bör vara i det närmaste obefintlig medan däremot partiet under slukhålerna bör ha stor luftcirkulation och stora temperaturvariationer p g a den blandning mellan luft och vatten som sker när vattnet störtar ner i schakten (se Bögli 1978).

Temperaturvariationerna i grottan tycks till största delen bero på det genomrinnande vattnet, eventuellt kan också den relativa luftfuktigheten vara det. De torrare delarna av Fossila Systemet har därför det mest stabila klimatet med avseende på temperatur och luftfuktighet trots att det är enbart här som vindar konstaterats.

Temperaturen i grottans orörda delar varierar mellan 3,5 och 9,0°C, men på 1,5 m höjd över vattenytan är temperaturen stabilare, mellan 4,0 och 8,5°C. Den relativa luftfuktigheten varierar i hela den kända delen av grottan mellan 95 och 100%, men den går sällan under 97%.

De partier av grottan som är belägna mellan C och G i fig.79 uppvisar relativt små variationer i klimatet under ett år, dessa delar bör därför benämnas statodynamiska. Mellan A och C är påverkan av klimatet något större, framförallt kan det förekomma relativt snabba temperaturvariationer, varför det är lämpligare att beteckna denna del av grottan som dynamisk. Troligtvis gäller detta även för partierna G till H, under slukhålen.

Avslutningsvis vill jag nämna att klimatstörningarna i visningsdelen är förvånansvärt små med tanke på det stora antalet besökare. Andra liknande klimatundersökningar av turistgrottor, t ex Lysenko (1975) och Fodor (1975), har visat på betydligt större förändringar.

Det största problemet i turistdelen av grottan är det mikroklimat som skapas kring ljuskällor. Värmen och ljuset gör att en riklig vegetation av lavar och mossor bildas. Detta är ett problem i alla turistgrottor då det är de mest sevärda formationerna (och därmed mest belysta) som drabbas. Beväxningen kan minimeras genom att använda ljus av viss färg, göra belysningstiden så kort som möjligt och placera belysningen på avstånd från de sevärdheter som skall framhävas.

Vid ett kort besök i grottan i september 1980 uppmättes i hela visningsdelen en betydligt lägre relativ luftfuktighet än vid någon tidigare mätning (min 85%). Dessutom var temperaturen genomgående över 8°C. En trolig förklaring är att luftslussen ännu inte hade monterats in varför luftcirkulationen varit onormalt stor under sommaren. I oktober 1980 var emellertid både temp. och rh "normala" igen.

14. SPELEOBIOLOGI

En grotta utgör ett ekosystem med mycket speciella betingelser där växt och djurlivet kan följa en helt unik utvecklingslinje. Grottor har därför blivit intressanta studieobjekt för biologer då man där på en och samma ort kan studera olika evolutionsförlopp. Inom den internationella speleologiska forskningen finns en särskild biospeleologisk sektion (se fig.1), som i huvudsak består av forskare med biologisk bakgrund. En av de mera framstående biospeleologerna i världen var framlidne dr Knut Lindberg från Lund (1892 - 1962). Hans intresse för grottfauna väcktes i Indien där han sedan 1924 tjänstgjorde i flera olika perioder som läkare och forskare. Han hann publicera ca 150 arbeten på olika språk. Publikationerna behandlade faunan i mer än 1 200 grottor från ett fyrtiotal olika länder, främst Afgani- stan, Portugal, Grekland och Turkiet (se Tell 1964 och Sjöberg 1975).

Lummelundagrottan har redan tidigare varit föremål för speleo- biologiska studier av Gislén & Brinck (1950), Hinricsson (1955) och Lundevall (1964). Den mest omfattande av dessa studier var den av Gislén & Brinck. Deras undersökning omfattade även andra subterrana vatten på Gotland. De tre ovan nämnda studierna om- fattade enbart de yttre delarna av grottan varför föreliggande undersökning får anses vara den första mera fullständiga studien.

Då jag själv ej har tillräckliga kunskaper i speleobiologi an- litades Bill Odell, som förestår speleobiologiska sektionen inom Sveriges Speleolog-Förbund, för att genomföra undersök- ningen. Hittillsvarande resultat har sammanställts av Odell i två rapporter (Odell 1978 och 1979) varifrån data i nedanstående text har hämtats. Den speleobiologiska undersökningen av grottan är dock inte att anse som avslutad då uppföljningar kommer att

genomföras av Odell under flera år framåt. Det rena inventeringsarbetet, när det gäller den del av grottan som var känd fram till utgången av 1979, får dock anses som komplett. Det är dock möjligt att det i de ännu utforskade delarna av grottan kan finnas ytterligare djurarter utöver de 83 som noterats (se bilaga 3).

FAUNAN

Vid inventeringsarbetet har grottsystemet indelats i 32 slumpmässigt utsatta referens- och fångstområden (se fig.81). Inom varje sådan sektor har en eller flera fällor varit aktiverade, och vid varje inventeringstillfälle har samtliga stationer noggrant undersökts för hand. En del inventeringar i de vattenförande delarna av grottan har genomförts med rött ljus för att undvika störa djuren.

För att skona faunan från för stora påfrestningar har insamling vidare skett enbart för att erhålla ett visst referensmaterial (deponerat på Naturhistoriska Riksmuséet) eller då identifiering varit omöjlig i fält. Större delen av materialet har dock kunnat bestämmas på stället och sedan släppts tillbaka på fångstlokalen. Fällor har använts sparsamt med tanke på att grotffaunor är ytterst känsliga. Till och med små insamlingar kan få allvarliga följder på faunaekosystemet. De fångstanordningar som först användes hade inget lockbete och var av sådana typer som beskrivits av Barber (1931), Chauvin (1963), Guyer & Hutson (1955) och Jackson & Taylor (1950). Under undersökningens senare del har observationsarbetet huvudsakligen utförts under frisimning i grodmansdräkt och med manuella håvar. De fällor som då dessutom använts har varit av Odells egen konstruktion (se fig.80) och i mindre mån av Barbertyp modifierade av May (1963). Dessa fällor var försedda med lockbete och fångade djuren levande så att de kunde släppas tillbaka efter undersökning. Som grund för insamlingsmetodik och statistiska beräkningar har arbeten av Elliott (1977) och Schwoerbel (1970) använts.

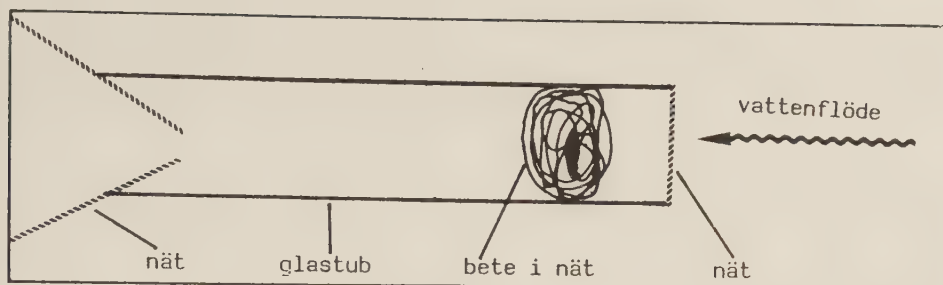


Fig. 80 Fångstfälla för vattenlevande smådjur. Fällan används vid inventeringen av grottans fauna.

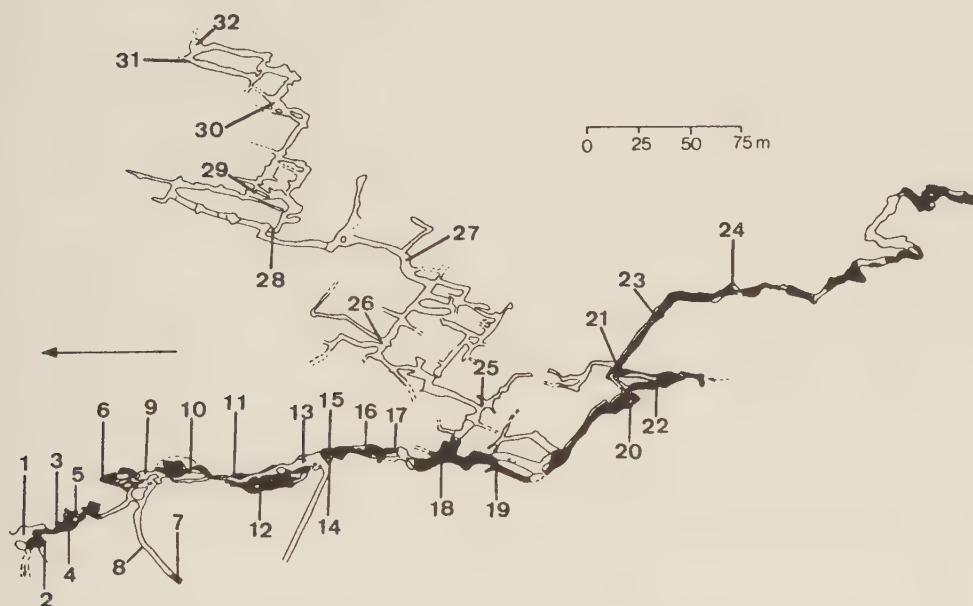


Fig. 81 Karta över Lummelundagrottan med fångstplatserna inlagda.

I nedanstående text kommer en del fackuttryck att användas. Då dessa termer är svåra att ersätta med enkla svenska översättningar inleder jag här med att förklara termerna:

Trogloxen. Organism som under en viss tid på dygnet eller året vistas i grottor. Ett välkänt exempel är fladdermöss.

Troglofil. Organism som lever mer eller mindre kontinuerligt i grottor men som har relationer med ytlevande arter.

Troglobiont. Organism som helt lever i grottor och har anpassat sig till denna miljö. Har anpassningen gått så långt att arten

markant skiljer sig från ytlevande liknande arter kallar man dem för troglomorfa. Ett välkänt exempel på en troglomorf troglobiont är olmen som förekommer i sydeuropeiska grottor.

Lummelundagrottans kända delar kan grovklassificeras i sex olika ekotyper (siffrorna hänvisar till fig.81): mynningszon 1-2, skymningszon 2-4, partiellt belyst zon 6-14, vattenförande mörk zon (våtzon) 15-24 och icke vattenförande mörk zon (fuktzon) 25-32.

I den yttre delen av grottan (1-14) förekommer främst hygrofila och sciofila arter (som tycker om fukt respektive trånga utrymmen). Många av dessadjur är trogloxena, en del övervintrar t ex i grottan. Den största delen av denna faunan kommer in i grottan via mynningen eller spolask ner i slukhålerna under högvatten. Under senare år har också en del insekter och spindlar kommit in i grottan via de sprängda tunnlarna.

I mynningsgrottan förekommer ibland djur som normalt inte söker sig in i grottor, under sommaren t ex groddjur och insektsjagande småfågel och under vintern möss och t o m kaniner. Enligt ortsbefolkningen har även en del fisk vandrat upp till grottmynningen, främst ål och laxöring. Spigg har iakttagits långt in i grottsystemet.

I grottans vattenförande delar är faunan främst akvatisk. Tack vare de stora vattenmagasinen finns det möjligheter för en stationär fauna att producera nya generationer, födan (organiskt material) förs in i systemet via slukhålerna. De terrestra djuren finns i denna del av grottan nästan uteslutande nära vattnet eller i sprickor fyllda med fuktig lera. De flygande insekterna förekommer sparsamt här liksom i Fossila Systemet. En anledning till detta kan vara att grottan fram till 1978 var relativt väl avspärrad mellan Sal 5 och Sal 6 (12-13).

Fossila Systemet är betydligt artfattigare än övriga delar av grottan vilket främst beror på de sparsamma förekomsterna av vatten. På vissa ställen är däremot sedimenten rika på organiskt innehåll och i dessa förekommer det ofta ringmaskar, främst daggmask. Detta är inget ovanligt i grottor, fenomenet har bl a studerats av Trevor (1977) i England. Han konstaterade att en del av maskarna kommit in via sprickor från markytan men att de dessutom tycks föröka sig i grottorna.

I bilaga 3 finns en komplett förteckning över de 83 arter som påträffats i grottsystemet. I listan anges även antal iakttagna individer vid de 32 observationstillfällena i grottan.

De flesta av de noterade djurarterna är vanliga utanför grottmiljön, men grottans fauna är trots detta unik för Sverige. Större delen av faunan har adapterat sig till den underjordiska miljön och en del arter har t o m utbildat troglobiontiska karaktärer t ex pigmentlöshet (flera av dessa arter är i bl a mellaneuropa kända som troglobiontiska enligt Odell 1979). Vi kan dock inte räkna med att hitta någon äkta grottart i Sverige då evolutionen haft allt för kort tid på sig sedan den sista nedisningen. Lummelundagrottans fauna kan därför inte jämföras med den kontinentala speleofaunan där djurarter i vissa fall haft årmiljoner på sig att utvecklas, men Lummelundagrottan erbjuder istället intressanta forskningsobjekt inom grottfysiologi och grottimmigration.

Av de 83 arter som registrerats i grottan kan 13 anses vara troglofila med mer eller mindre utbildade troglobiontiska karaktärer. De 13 arterna är: *Porhomma p.*, *Aranea d.*, *Meta menardi*, *Meta merianae*, *Lumbricus*, *Lumbriculus*, *Allolobophora*, *Eiseniella*, *Nais*, *Planaria t.*, *Tubifex b.*, *Asellus a.* och *Gammarus p.* (se artlistan bilaga 3). Av dessa är de fyra sistnämnda arterna vattenlevande och samtliga har någon distinkt troglobiontisk karaktär. Dessa fyra arter har studerats i detalj, nedan ges en kort sammanfattning av resultaten.

Planaria torva Schulze (plattmask):

Familjen *Planaria* är spridd över större delen av Europa och är normalt bunden till kalla vattendrag. Arten förekommer i grottor i hela sitt utbredningsområde men är inte vanlig i denna miljö. På Gotland är arten relativt vanlig i sötvatten.

Normalt är djuret grått till gråbrunt med irregulära fläckar eller ränder men stammen i Lummelundagrottan är nästan helt pigmentlös utom i de yttre delarna av grottan. De *Planaria t.* som hittats i grottan är extremt ljuskänsliga. De påträffas nästan alltid på kala grottväggar eller under stenar där vattendjupet är ringa eller strax under ytan i djupare vatten. Ofta finner man djuren i små grupper.

Inga årstidsbundna fluktueringar inom populationstätheten har spårats, men under vårfloden blir djuren inaktiva. Dygnsrytmen

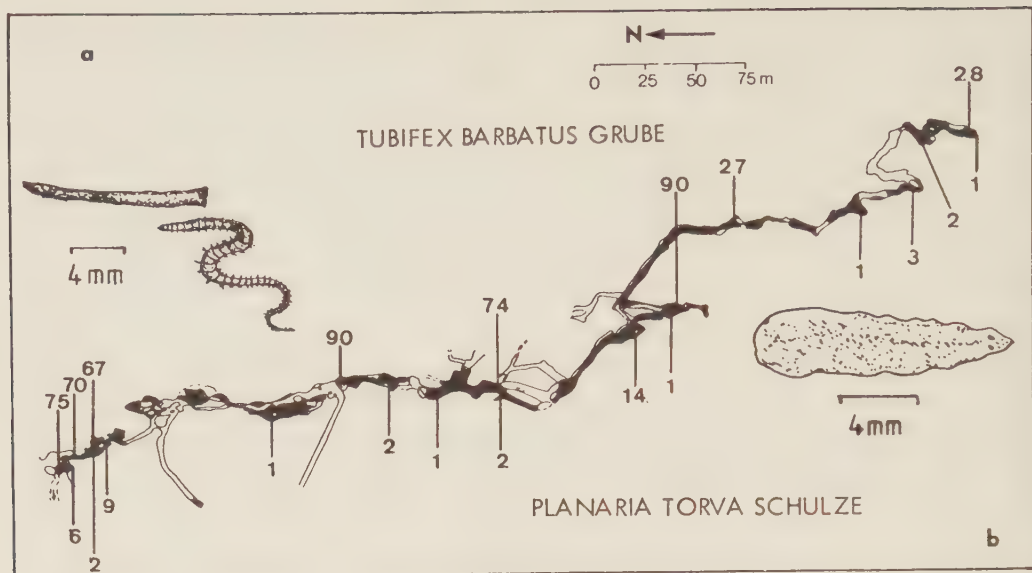


Fig. 82 Övre delen visar antalet iakttagna individer av *Tubifex b.* på olika platser i grottan. Ringmasken och dess bo-rör är avbildade. Nedre delen: antalet iakttagna indi- vider av *Planaria t.* samt hur plattmasken ser ut.

är fullt märkbar i grottan det är därför bäst att studera djuren nattetid då de förekommer på öppna ytor. *Planaria torva* är inte vanlig i grottan jämfört med resten av den akvatiska faunan. Djuren förekommer dessutom enbart i vissa begränsade områden. Den saknas t ex i de delar där botten utgöres av lera eller sand och där vattnet strömmar starkt. Artens utseende, förekomst i grottan och antal påträffade individer framgår av fig. 82b.

Tubifex barbatus Grube (ringmask):

Arten är relativt vanlig i norra och mellersta Europa och före- kommer i många skiftande miljöer. De är inte ovanliga i sub- terrana vatten och räknas som troglfila. Arten förekommer i Sverige men någon uppgift om förekomst på Gotland har inte på- träffats. Undersökningar av vattendragen kring Lummelunda har också givit negativt resultat, medan de däremot förekommer rik- ligt i grottan och i en del närbelägna brunnar. (Det är inte omöjligt att dessa brunnar står i kontakt med den underjordiska Lummelundaströmmen då vattenytorna ligger på ungefär samma nivå).

Då djuren lever i rör som är nedgrävda i finkorniga sediment förekommer de enbart där botten är av sådan beskaffenhet, dessutom förefaller de bara att finnas där vattnet är relativt djupt och där vattenströmningen är minimal. De tätaste individansamlingarna har därför påträffats i de djupaste vattensamlingarna i grottan vilket framgår av fig.82 a där också rörmasken och boröret är avbildade.

Asellus aquaticus Linné (vattengråsugga):

Arten påträffas i hela Europa och det finns en del former som enbart lever i grottor. På Gotland är den, till skillnad mot *Tubifex barbatus*, vanligt förekommande såväl över som under jord. Förutom i grottan har den påträffats i kringliggande källor och brunnar.

De grottlevande individerna är helt pigmentlösa men även mer eller mindre pigmenterade exemplar förekommer, de senare dock enbart i de yttre delarna. De grottlevande djuren har jämförts i laboratorieförsök tillsammans med individer från Lummelundaströmmens ytvatten. Grottdjuren visade sig vara så väl anpassade till den underjordiska miljön att de avled när de utsattes för relativt ringa temperaturförändringar och solljus. Enligt Odell (1979) verkar de grottlevande *Asellus aquaticus* befinna sig på ett stadium i utvecklingen mellan troglobil och troglobiont. Han anser dessutom att arten kommer att bli en äkta grottf orm om den får utvecklas fritt utan störningar.

Arten är den vanligst förekommande av de vattenlevande djuren i grottan. Fig.83b redogör för djurens utbredning i grottan.

Gammarus pulex De Geer (märlkräftor):

Arten är relativt vanlig i hela Europa och förekommer där även underjordiskt. Arten har på kontinenten utvecklat en äkta troglobiont form och en helt grottanpassad form. På Gotland är djuret vanligt förekommande i vattendrag.

Gammarus pulex förekommer i hela den vattenförande delen av grottan oberoende av bottenmiljö men sitter oftast fast på undersidan av stenar. Arten tycks sällan frisimma i grottan och speciellt inte under perioder av högvatten då de är inaktiva. Odell tolkar detta som en skyddsmekanism hos djuren för att för-

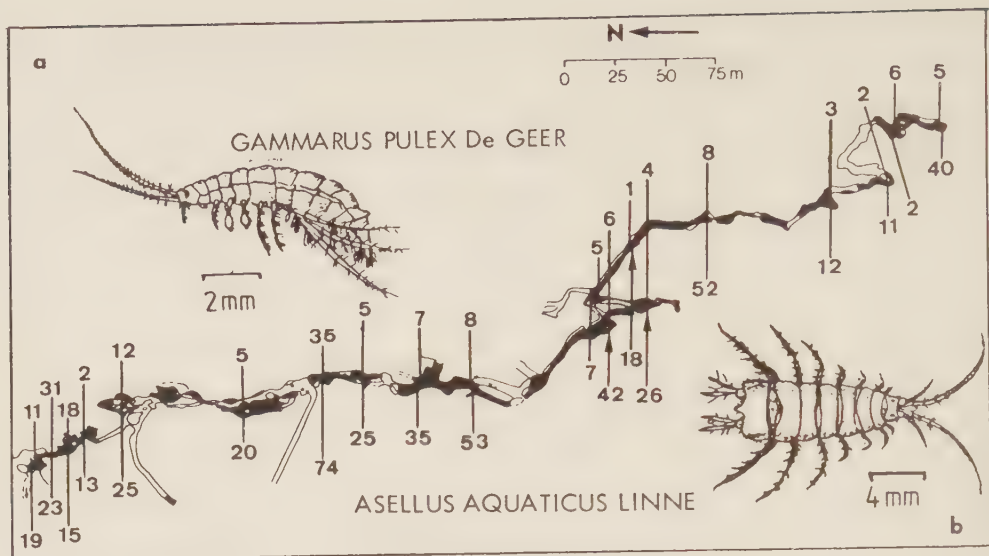


Fig. 83 Övre delen visar antalet iakttagna individer av *Gammarus p.* på olika platser i grottan. Övre fig. visar också hur märklkräftan ser ut. Nedre delen visar antalet iakttagna individer av *Asellus a.* samt hur vattengråsuggan ser ut.

hindra att de då förs med strömmen.

De flesta iakttagna djuren hade pigment, i de innersta delarna av grottan var de dock så gott som pigmentlösa med undantag av ögonen. Djurens beteende tyder på att de har en dygnsrytm och att de liksom föregående art, *A. aquaticus*, är dagaktiva. Fig. 83a visar på förekomst, antal och utseende.

Ända sedan mitten av 1800-talet då Martebo myr dikades ut har grottsystemets djurliv varit utsatt för störningar. Lummelundaströmmen som matar grottan med vatten kommer nu från odlingsområden och för med sig ökande mängder av gödningsämnen och bekämpningsmedel. Tidvis har den på grund av regleringen fört så små mängder vatten att grottan delvis torrlagts. Subterrana faunor är mycket känsliga för såväl fysiska som kemiska förändringar av omgivningen (se försöken med *Asellus aquaticus*), varför alltför stora förändringar av vattenkvaliteten eller vattennivån kan få katastrofala följder. Av denna anledning är det önskvärt att vattenkvaliteten kontrolleras regelbundet och att ett visst minimiflöde genom grottsystemet garanteras.

Ett annat slag av störningar har iakttagits i anslutning till visningsdelen av grottan. Den stationära faunan här är både art- och individfattig. Det är också här flertalet av de terr-estra djuren påträffats varav åtskilliga har tagit sig in i systemet via tunnlarna eller mynningen. Dessa djur reagerar inte nämvärt på ljus till skillnad mot de som förekommer i de inre delarna av grottan.

Egendomligt nog tycks inte de två mindre fladdermuskolonier, som finns i nära anslutning till visningsdelen (en bakom station 6 och en bakom station 10), störas av turistverksamheten. Även om inget ljus når dem (svagt ljus når fram till sovsprickornas mynning) förekommer andra störningar som diskontinuerligt luftdrag och buller.

FLORAN

Växtlivet är mycket sparsamt representerat i de oexploaterade delarna av grottan. I vissa gånger växer det stenlav och i Fossila Systemet har två små funguskolonier noterats. Dessutom har där på flera ställen iakttagits små embryonala plantor av andmat (5 - 20 mm höga). Dessa plantor förekommer i de delar av Fossila Systemet som under vårfloden genomrinnes av vatten varför vi förmodar att frön har förts dit av vattnet. En egenomlig sak i sammanhanget är att de spröda vita skotten ibland har skiftat i grönt vilket bör tyda på fotosyntes.

I visningsdelen av grottan har belysningen gjort att vegetationen kunnat breda ut sig avsevärt. Där finns kolonier med flera arter av alger, lavar och mossor. På vissa platser i grottan finns täta mossbestånd och på ett ställe har t o m en grupp ormbunkar utvecklats. Denna vegetation är både oönskad och skadlig. Dels täcker den de speleothems som belyses och fördärv- ar därmed deras naturliga skönhet. Vad värre är att växterna angriper den grund de växer på med frätskador som följd. Dessutom tar växterna hand om det vatten som annars skulle ha fortsatt att bygga upp kalcitutfällningarna vilket medför att dessa "dör" och kommer att förlora de naturliga färgerna (enligt Ly-senko 1975). Detta kan till stora delar förhindras om vegeta- tionen avlägsnas med jämna mellanrum. Andra förebyggande åt- gärder är att placera belysningen på avstånd från formationerna

så att inte värmen påverkar dessa samt genom att använda färgat ljus. Mest lämpligt är då grönt ljus som gynnar fotosyntesen i mindre omfattning än ljus av andra våglängder. Dessutom bör ljuset vara tänt så kort tid som möjligt.

Den rikligaste floran i hela grottan uppträder där tillgången på ljus är störst d v s i anslutning till grottmynningen. De mossor, svampar, alger och lavar som finns där har beskrivits av Gislén & Brinck (1950). Växterna förekommer ända in till punkt 5 vilket i princip är så långt in som ljuset når. Även innanför denna punkt uppträder en del alger i det som vi uppfattar som kolmörker. Cox & Harvey (1977) förklarar detta med att vissa alger kan överleva fotosyntetiskt djupt innanför grottmynningar dit ytterst lite ljus når.

15. KARSTGROTTOR - UPPKOMST OCH UTVECKLING

HUR KARSTGROTTOR BILDAS - FÖRSLAG TILL KLASSIFICERING

De tidigare kapitlen och mitt urval av litteraturreferenser har kanske givit ett intryck av att grottforskning är en modern företeelse. Speleologin som vetenskap är förvisso relativt ung men det vetenskapliga intresset för själva grottorna är långt-ifrån nytt. I en doktorsavhandling om speleologisk vetenskapshistorik fram till år 1900 anger Shaw (1979) att den tidigast nedtecknade studien av en grotta härrör sig från Assyrien år 825 f.Kr. Sedan dess har många, i våra ögon, mer eller mindre fantasifulla teorier lagts fram om hur grottor har bildats. Shaw ägnar ett omfattande kapitel åt alla dessa teorier.

De moderna teorierna om karstgrottors genes började växa fram kring sekelskiftet. Helldén (1974) ger en redogörelse för dessa teorier fram till början av 1970-talet. Det är inte min avsikt att upprepa denna teoriutveckling utan jag skall istället diskutera hur teorierna ser ut idag.

Samtliga karstforskare idag tycks vara helt överens om att karst-

grottor bildas av vatten och att grottor, med få undantag, har varit helt vattenfyllda i initialstadiet, d v s de har varit freatiska. För övriga teorier eller modeller om karstgrottors utveckling gäller följande: I de handböcker som publicerats under 1970-talet (Jennings 1971, Sweeting 1972, Ford & Cullingford 1976, Jakucs 1977, Moore & Sullivan 1978 och Bögli 1978) liksom i symposie- och kongresskrifter med grottgenges som tema anges inga enhetliga eller klara modeller för hur karstgrottor uppstår och utvecklas. Men påtagligt är att de flesta författare har tagit intryck av D.C.Fords teorier om tre "vanliga" utvecklingsmodeller (han anger även en fjärde modell, "special case" som dock sällan diskuteras). Dessa modeller har Ford behandlat i sju uppsatser mellan 1964 och 1978 (Ford & Ewers 1978). Två av Fords modeller bygger på tvåcykelteorin av Davies (1930) och den tredje, "watertable cave", kan härledas till Swinnerton (1932). I korthet kan de beskrivas så här (bokstäverna hänvisar till fig.84):

- A. Freatisk grotta helt ubildad under grundvattenytan.
- B. Vadös grotta, utbildad av genomrinnande vatten med luftrum mellan vattenytan och taket. I de flesta fall ligger grottan över grundvattenytan.
- C. "Watertable cave", bildad utefter en grundvattenyta. Egentligen är denna typ av grottor inget annat än ett specialfall av freatiskt bildade grottor. På svenska föreslås "vattenytegrotta".

Dessa tre genetiska modeller anses som mest giltiga men de är enligt min uppfattning bristfälliga. Detta återspeglas också i de ovan nämnda handböckerna där författarna på olika sätt har försökt sätta in modellerna i ett vidare sammanhang. Ingen av dem har dock presenterat någon systematisk indelning av karstgrottor eller av deras bildningssätt. En anledning till detta kan vara att en grotta oftast har genomgått olika utvecklingsstadier beroende på förändringar i t ex klimat, hydrologi eller erosionsbas. Bini & Giulio (1977) menar att det är just denna komplexitet som gör att existerande teorier om grottbildning är otillräckliga då de är alltför förenklade.

Bristen i Fords indelning är enligt min åsikt att samtliga modeller utgöres av genomströmningsgrottor, d v s de står i för-

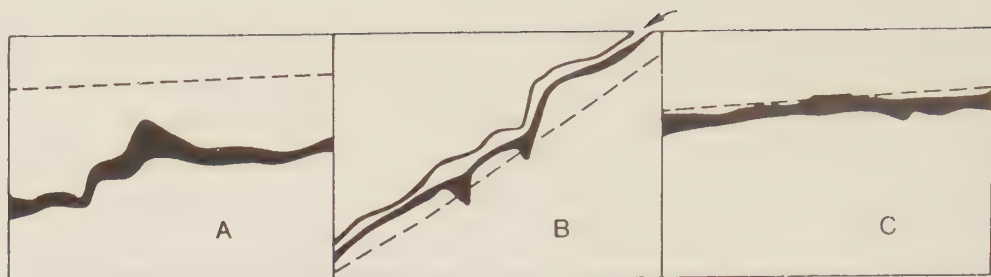


Fig.84 Tre genetiskt olika typer av grottor. Streckad linje markerar grundvattenytan. A = freatisk grotta. B = vadös grotta där vattnet rinner som en bäck genom grottan. C = vattenytegrotta (Watertable cave).

bindelse med både källor och slukhål så att vattnet förflyttar sig relativt snabbt genom grottorna. Fig.84A och C har jag medvetet ritat så att det inte framgår om de vattenfyllda hålrummen har öppna förbindelser med markytan eller inte, medan det i Fords illustrationer finns källor och sluk till varje typ av grotta. Fords figurer av vattenytegrottor visar i själva verket före detta vattenytegrottor som nu är vadösa, se fig.85. Förklaringen kan vara att de flesta kända karstgrottor står i förbindelse med markytan via sluk och/eller källor då det främst är via dessa som grottorna upptäcks och utforskas. Ford nämner själv (1971) att amerikanska författare tenderar att använda de största kända grottorna som normgivare för grottgenesen som helhet.

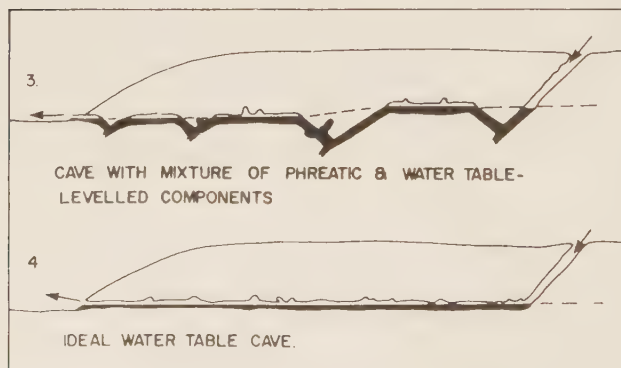


Fig.85 3 = blandning av freatisk och vattenytegrotta. 4 = vattenytegrotta som övergått till ett vadöst stadium (after Ford 1977).

Det är tämligen självklart att de flesta kända grottorna har naturliga öppningar, men med tanke på att flera grottor utan naturliga förbindelser med markytan har påträffats är det egen-

domligt att större hänsyn inte tagits till dessa vid utformandet av moderna grottbildningsteorier. Dessa grottor har alltså bildats av grundvatten som förflyttar sig långsamt genom berggrunden och som ej står i förbindelse med öppna slukhål eller öppna källor. Sådana grottor påträffas vid borrning i berggrunden, vid gruvbrytning eller när grottaket störtar in. De flesta "slutna" grottor påträffas dock genom att de blottlägges när landytan ovanför grottan eroderas ner, de har alltså en naturlig öppning men öppningen är inte bildad genom karstprocesser i själva grottsystemet.

Tyvärr finns det ingen sammanställning över hur många "slutna" grottsystem som är kända. Warwick (1976) nämner flera sådana grottor som blivit upptäckta i dagbrott eller vid underjordsbrytning. Han nämner bl a en grottsal på 43 x 67 m med en höjd av 30 m som påträffats vid gruvbrytning och en ännu större sal som hittats och pumpats torr 150 m under havets nivå. Ryder (1975) behandlar två labyrintgrottor i Yorkshire, också funna vid gruvsdrift, och han finner det troligt att denna typ av slutna system kan utgöra initialstadier till grottor som senare kommer att leda vatten mellan sluk och källor. Palmer (1975) har ställt samman information om 260 labyrintgrottor i USA och Europa. 60% av dessa anger han har bildats genom "diffuse infiltration". Han nämner inget om att de varit helt slutna system, men i en principskiss visar han en sluten grotta som blottlägges när en dalgång eroderar sig ner genom berget. Han säger också: "Intersections with the land surface appear to be random and are generally not significant points of recharge or resurgence" och längre fram i texten: "but scallops and other indicators of water flow are typically absent, except very locally". Själv tolkar jag detta som om flertalet av dessa 156 grottor under sitt aktiva stadium har varit slutna och att de nu är tillgängliga genom att den omgivande landytan har eroderats ner. Samma gäller troligen för många andra vattenytegrottor och freatiska grottor.

I Sverige har fyra slutna grottor påträffats vid brunnsgrävningar. Tre av dessa finns i den ordoviciska kalken kring Storsjön, därav två i Sanne och en i Hackås (Freij 1968), men en av Sannegrottorna kan dock vara bildad huvudsakligen genom tektoniska rörelser. Hörviksgrottan i skalgruskalk söder om Sölvesborg, är däremot en äkta labyrintgrotta med trånga gångar och

mindre salar (Persson 1963, Åkerman 1972). Det är en slump att dessa fyra grottor påträffats och att de kommit till speleologiskt intresserade personers kännedom. Det är därför troligt att åtskilliga slutna grottsystem förekommer i svenska kalkstensområden. Ytterligare indicier på detta är den troligen slutna grottan som påträffats vid borrhning efter vatten vid punkten G i fig.4 (ej att förväxla med den del av Lummelundagrottan som också påträffats vid borrhning, D i samma fig.). Vid slingrammätningar i området har dessutom flera vattenförande kanaler konstaterats (se fig.48) som förmodligen utgör slutna system. En intressant uppgift vore att gå igenom Brunnsarkivets uppgifter beträffande påträffade hålrum i kalkberggrund.

Med ovanstående har jag velat påvisa existensen av vad jag kallar slutna grottor. Beteckningen syftar på genesen och alltså inte på det nuvarande tillståndet då systemet kan ha naturliga eller konstgjorda öppningar till den fria atmosfären. Med tanke på det antal slutna grottor som av slumpen påträffats vid arbeten i berggrunden finner jag det sannolikt att så pass många okända sådana bör existera att de inte kan uteslutas i teorier om karstgrottors genes, speciellt inte med tanke på att det verkar som om åtskilliga kända grottor har bildats som slutna system. Av denna anledning vill jag revidera Fords tremodellssystem och samtidigt försöka systematisera karstgrottor på ett sådant sätt att även det nuvarande utvecklingsstadiet framgår klart. Till viss del kan även grottans morfologi utläsas genom denna systematisering eftersom vissa faser ger upphov till speciella tvärprofiler, men vad gäller gångsystemets horisontella och vertikala utbredning är det inte möjligt att på ett enkelt sätt föra in dessa variabler. Det är då enklare att i samband med klassificeringen, enligt systemet nedan, kortfattat beskriva storlek och utbredning, eller ännu hellre redovisa detta i kartform.

I nedanstående klassificering har alla beteckningar utom två (öppna och slutna grottor) hämtats från de engelskspråkiga speleologiska litteraturen. Beteckningarna i grupperna A och B är accepterade och entydiga medan existerande definitioner av beteckningarna i grupp D är diffus. Influent cave och effluent cave betecknar t ex ofta det ställe där vatten försvinner ner i respektive fram ur marken - trots att någon egentlig grottbildning kanske inte existerar i anslutning till sluket eller

källan. Det är i detta sammanhang väsentligt påpeka att det här föreslagna klassificeringssystemet enbart gäller för grottor, alltså hålrum av sådan storlek att de rymmer en person av normalstorlek (def. av Curl 1964). En karstkälla bör därför inte benämnas utloppsgrotta om den inte själv utgör en grotta.

Förslag till indelning av karstgrottor efter hydrologisk status och hydrogenes:

A. Indelning efter hydrologisk status.

1. Aktiv = ständigt vattenförande
2. Intermittent = grotta som omväxlande är vattenförande och torrlagd
3. Fossil = grotta som inte längre för vatten.

B. Indelning efter hydrogenes (se fig.84).

1. Freatisk = grotta som vid utbildandet varit helt vattenfylld. Grottan är för det mesta utbildad under grundvattenytan och gångsystemet följer oftast svaghetszonerna i berggrunden i både horisontell och vertikalled då vattnet kan röra sig fritt i alla riktningar.
2. Vadös = grotta bildad av ett underjordiskt vattendrag vilket rinner fram som en bäck med en luftspalt mellan vattnet och grottans tak. Gångsystemet är oftast enkelt (ej labyrintartat) och utbildat efter svaghetszoner, men i vertikalled följer gångarna bara dessa zoner nedåt p g a det rinnande vattnet.
3. Vattenytegrotta (watertable cave) = bildad strax under och parallellt med grundvattenytan. Utbredningen i sidled bestämmes av svaghetszoner i berget medan den vertikala utbredningen följer grundvattenytan, d v s grottan är relativt plan och lutningen följer grundvattenytan (den som existerade när grottan bildades). Denna typ av grottor är egentligen specialfall av freatiska grottor då båda anses vara helt vattenfyllda vid utformandet.

C. Indelning efter förbindelser med sluk/källor (se fig.86).

1. Sluten = grotta utbildad av grundvatten som ej står i direkt förbindelse med sluk eller källor.

2. Öppen = grotta bildad av vatten som strömmar relativt snabbt genom systemet. Vattnet tillföres grottan via slukhål och /eller avtappas via källor. De öppna grotorna indelas i sin tur vidare efter förhållanden till källor och sluk.
- 2a. Inloppsgrotta (influent cave) = har en eller flera mynningar där vattnet rinner eller har runnit in i systemet. Påvisbart utlopp (källor) till systemet saknas.
- 2b. Utloppsgrotta (effluent cave) = har en eller flera mynningar där vatten rinner eller har runnit ut ur systemet. Påvisbart inlopp (sluk) till systemet saknas.
- 2c. Genomströmningsgrotta = har ett eller flera inlopp där vatten rinner eller har runnit in i systemet samt ett eller flera utlopp där vattnet dräneras eller dränerats bort.

Sammanfattning av klassificeringssystemet:

- A. Hydrologiskt status: 1. Aktiv 2. Intermittent 3. Fossil
- B. Hydrogenes: 1. Freatisk 2. Vadös 3. Vattenyttegrotta (water-table)
- C. Samband med ovanjordisk dränering: 1. Sluten 2. Öppen
 - 2a. Inloppsgrotta 2b. Utloppsgrotta 2c. Genomströmningsgrotta

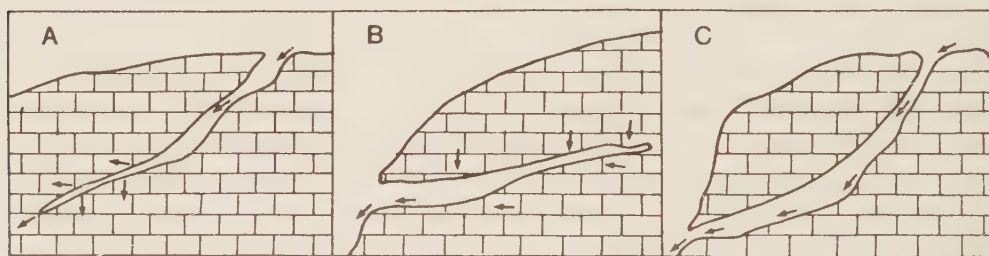


Fig. 86 De tre förekommande typerna av öppna grottor.

- A = inloppsgrotta som saknar utlopp, nedströmmande vatten pressas ut i små vattenledare i berget t ex sprickor.
- B = utloppsgrotta, vattnet i berggrunden dräneras bort via en öppen källa.
- C = genomströmningsgrotta där vattnet rinner genom grottan (vanligaste typen av öppna grottor).

En sak som eventuellt bidragit till att någon egentlig genetisk klassificering av karstgrottor inte har upprättats är att en och samma grotta kan omfatta gångsystem som är aktiva, intermittenta och fossila samt freatiska och vadösa. Dessutom övergår inte sällan freatiska och vattenyttegrottor (likväl som enskilda gångar) till vadösa, och slutna grottor kan omvandlas till öppna. Dessa problem kan emellertid övervinnas med ovanstående klassificering.

Har en grotta övergått från ett stadium till ett annat och tydliga spår finns av det föregående, d v s båda stadierna har starkt präglat utformningen, anges detta med ett bindestreck: freatisk - vadös, sluten - öppen eller vattenyttegrotta - vadös vilket är tre kombinationer som kan komma ifråga.

Innehåller grottan partier med skild hydrologisk status markeras detta med ett snedstreck, rangordningen anger fördelningen: Aktiv/fossil/intermittent betecknar t ex Lummelundagrottans nuvarande tillstånd.

Då en klar definition av inlopps- respektive utloppsgrotta inte har funnits har begreppen använts för att beteckna skilda fenomen. Om en grotta t ex är tillgänglig via utloppet benämns den ofta utloppsgrotta även om den i själva verket är en genomströmningsgrotta, motsvarande gäller om den är tillgänglig via inloppet. Denna information om grottan kan på ett enkelt sätt vävas in i klassificeringen genom att t ex beteckna en genomströmningsgrotta som enbart är tillgänglig via utloppet enligt följande: Genomströmningsgrotta/utlopp. Går det att passera genom hela systemet skrivs även "/inlopp" till, medan de grottor som är tillgängliga från båda håll, men där passage genom hela systemet inte är möjlig, betecknas detta lämpligen med: Genomströmningsgrotta/(inlopp)/(utlopp). De flesta större karstgrottorna i Sverige är av typen Genomstr.gr./inlopp.

Lummelundagrottan enligt ovanstående klassificering: Aktiv/fossil/intermittent. Watertable - vadös. Slutn - öppen, genomstr.gr./utlopp.

Ovanstående klassificering säger en del om hur de olika typerna av grottor bildas men inget om varför de bildas. Den vadösa utskulptureringen är relativt enkel att förklara då vattnet tack vare CO_2 -utbytet med luften kan förbli aggressivt under passagen genom grottan (se kapitel 6). Den mekaniska erosionen via partiklar som förs med det rinnande vattnet anses också ha en viss betydelse. Men vi får inte glömma att nästan alla karstgrottor i initialstadiet är utbildade helt under vatten. Då man länge vetat att vatten som inte står i direkt kontakt med luft mättas med kalk inom loppet av några minuter (se fig. 24) var den subakvatiska kalkutlösningen svår att förklara. 1964 presenterade emellertid Bögli sin teori om blandningskorrosion (Mischungskorrosion): "om två vattenmassor blandas, och båda är mättade på karbonater men med olika halter, förmår blandningen lösa ut ytterligare kalk". Han menade att detta kunde förklara hur grottor kan uppstå under grundvattenytan. Teorin rönste stor uppmärksamhet och man anser idag att blandningskorrosion till en viss del förklarar de freatiska grottbildningarna. En parentes till Böglis upptäckt: 1973 skriver Gvozdetzky att blandningskorrosion är en sovjetisk upptäckt som publicerades redan 1932 och 1939. Detta verifieras av Bögli själv, först 1978, samtidigt som han påpekar att han återupptäckte fenomenet 1961.

Sweeting (1972) nämner att blandningskorrosion enbart är en delförklaring till den djupa subakvatiska korrosionen. Detta är nu den allmänna inställningen vilket bl a framgår i de tidigare nämnda handböckerna från 1970-talet. Under 1960- och 70-talet har ytterligare teorier om djup freatisk korrosion lagts fram. Någon sammanställning av dessa förklaringar har dock inte gjorts förrän i detta arbete.

Här nedan görs ett försök att systematisera alla hittills framlagda möjliga förklaringar till bildning av karstgrottor. Förtydligande och litteraturhänvisningar finns efter sammanställningen.

A. Normalkorrosion

B. Blandningskorrosion: Vid blandning av kalkmättade vatten med olika halter av 1. kalcium 2. magnesium 3. eller övriga verkande joner.

C. Termisk korrosion: Orsakad av 1. avkylning 2. uppvärmning

- D. Oxidation: 1. CO_2 -tillskott via oxidation av organiska ämnen 2. svavelsyra från pyrit som oxiderats.
- E. Geoendogena faktorer: 1. CO_2 -tillskott från vulkanism och från fossila kolväten. 2. tillskott av andra kalklösande föreningar från samma källor 3. termalt vatten (troligen en kombination av 1+2).
- F. Hydrofysikaliska faktorer: 1. tryckkorrosion 2. kapillärkorrosion 3. turbulens 4. konvektion 5. kavitation.
- G. Mekanisk erosion

Förklaringar:

- A. Normalkorrosion avser den vanliga kalklösning som äger rum enligt Böglis schema fig.24. Där luft och vatten står i kontakt är denna korrosion av stor betydelse. På större djup under grundvattenytan anses normalkorrosionen ha ringa betydelse.
- B. 1. När mättade vatten med olika kalkhalt blandas kan ytterliggare kalk gå i lösning (Bögli 1964). 2. Samma sak kan inträffa om magnesiumhalterna är olika, Picknett & Stenner (1978) har påvisat att under optimala förhållanden kan aggressiviteten ökas med 24%. Vid viss halt magnesiumkarbonat sker emellertid ett omslag så att kalk istället fälls ut. 3. I samband med kalkkorrosion talas det nästan enbart om koldioxidens inverkan, men det finns givetvis flera andra föreningar som kan öka vattnets lösande förmåga. Detta gäller framförallt syror men även närvaron av alkalier som NaCl och KCl ökar kalklösligheten enligt Jakucs (1977).
- C. 1. Avkylningskorrosion är ytterliggare ett begrepp som skapats av Bögli (1978). Han grundar sig på det faktum att ett kallare vatten förmår lösa mera CO_2 och därmed mera kalk. 2. Renault (1960) har behandlat det motsatta fallet, där vatten värms upp. Kallt mättat ytvatten värms upp under vägen ner genom marken varvid CO_2 avgår och kalk fälls ut. Han menar att vattnet därvid åter blir aggressivt. Detta är endast tillämplbart i kalla och tempererade regioner vilket enligt Sweeting (1972) kanske förklarar varför flera djupa grottor är kända från sådana områden än från tropiska.
- D. 1. Howard föreslog 1964 att vattnets aggressivitet kan ökas

genom bakteriell oxidation av organiska komponenter i vattnet. Bray (1976) har senare genom fältförsök bevisat att så verkligen sker. 2. Howard föreslog också att oxidation av sulfider (pyrit finns ofta i kalksten) skulle medföra ökad aggressivitet då svavelsyra bildas vid oxidationen.

- E. De geoendogena faktorerna påverkar grottbildningen från underliggande geologiska formationer. 1. Bögli (1978) menar att CO₂ kan tillföras vattnet från vulkanisk aktivitet och från underliggande lager som innehåller gas eller olja. 2. Vulkanism och kolväten bör även kunna tillföra ovanför-liggande grundvatten andra lösningsförhöjande ämnen än koldioxid. 3. Det termala vattnets kalklösande förmåga är välkännt genom de gigantiska travertinavlagringar sådant vatten fällt ut på markytan, som exempel kan nämnas Yosemite i USA och Pamukkele i Turkiet.
- F. Grupperna A-E berör vattnets lösande förmåga genom förändringar av de kemiska egenskaperna. Grupp F tar upp de fysikaliska faktorer hos vattnet som påverkar kalklösningen. 1. Enligt Král (1975) förmår ett mättat vatten lösa mera kalk om trycket ökar. I öppna karstvattnenkanaler ökar det hydrostatiska trycket med djupet. 2. Cigna (1976) har påvisat att kalklösningen är större i kapillära sprickor än i öppna. Blandningen av vattnen från de båda spricktyperna kan sedan i sin tur medföra ytterligare korrosion. 3. White & Longyear (1962) har bevisat att turbulent strömning kraftigt gynnar kalklösningen. De har också konstaterat att diametern på karstkanalen skall vara över fem mm för att turbulens skall uppstå. Wigley (1976) anger att korrosionen ökar med en faktor på 30 när flödet övergår från laminärt till turbulent. 4. I nära nog stillastående vatten kan konvektionsströmmar inom vattenkroppen svara för att aggressiviteten ökar (Kempe et.al. 1975). 5. Kavitation (vattenhammareffekt) uppstår när gasbubblor kollapsar i snabbt strömmande vatten. Enligt Liszkowsky (1976) ökar även den korrosiva effekten vid kavitation.
- G. Utöver den kemiska erosionen, som behandlas under A-F, bör en del genomströmningsgrottor även ha påverkats av mekanisk erosion (korrasion). Ett strömmande vatten kan föra med sig mineralpartiklar som eroderar kalken, och vid förekommande kavitation kan korrasion uppstå.

HUR LUMMELUNDAGROTTAN UPPKOMMIT

Lummelundagrottan är en typisk vattenyttegrotta som ursprungligen bildades strax under en grundvattenyta vilken bör ha legat minst 3 m över den nuvarande nivån (avståndet mellan nuvarande yta och de högst belägna utlösningssformerna). Fig.87 illustrerar grottans utveckling fram till det nuvarande stadiet.

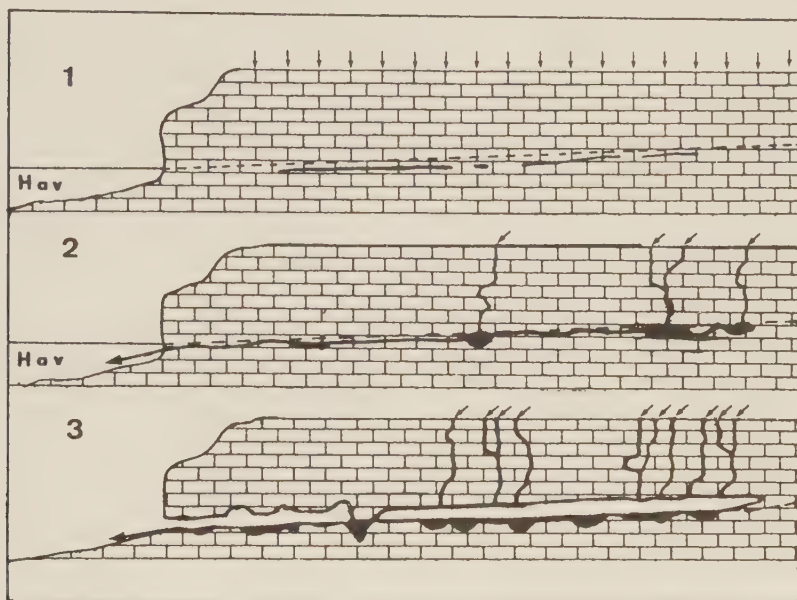


Fig.87 Lummelundagrottans utveckling till nutid. Streckad linje markerar grundvattenytan. 1 = nederbörden tränger ner i berggrunden via smala sprickor. Strax under grundvattenytan sker en korrosion när nederbörden möter grundvattnet, hålrum börjar utbildas. 2 = slukhål har börjat utbildas i ovanförliggande vattendrag, hålrummen har vuxit samman och kan snabbt leda bort vattnet d v s genomströmningen ökar och därmed troligen också korrosionen. 3 = flera slukhål har bildats och grottan dränerar nu berggrunden så att grundvattenytans nivå är den samma som basnivån i grottan.

I stadie 1 söker sig nederbörden ner i berggrunden via vertikala sprickor, som karaktäriserar kalkstenen. När detta förmodligen mättade vatten, blandas med grundvattnet, som fyller ut

sprickor, skiktfogar m m blir blandningen korrosiv varvid sprickorna långsamt vidgas. Enbart ett litet antal sprickor kommer att bilda grottor. Man förmodar allmänt att de sprickor gynnas som förmår leda ner mest vatten i berggrunden och transportera det vidare i horisontalled. En ytterligare styrande faktor bör tillförseln av vatten i sidled vara, så att sprickor som korsar de mest permeabla skikten prefereras. När öppna kanaler väl uppstått (kritisk dimension är 5-16 mm i diameter enligt Howard 1964) accelereras utvidgningen då grundvattnet kommer att förflytta sig snabbare och eventuellt också turbulent i de öppna kanalerna. Hålrums, mer eller mindre sammanhängande, kommer att uppstå strax under grundvattenytan. De enskilda hålrummen (långsträckta kanaler) kommer att växa huvudsakligen i sidled och nedåt. Detta är i vart fall vad man förmodar p g a att s k anastomoser (primära utlösningsskanaler) ibland påträffas i taket, huvudsakligen i grottor med horisontal utbredning (D.C. Ford 1971). Fig. 87:1 illustrerar hur enskilda hålrum uppstått under vattenytan utan några öppna förbindelser emellan. Slingramundersökningar vid Lummelunda gav också vid handen att det där kan förekomma hålrum som ännu inte står i öppen förbindelse med det genomgående dräneringssystemet (med "öppna" avses kanaler där vattnet strömmar fritt). I stadie 2 har de enskilda kanalerna vuxit samman och de dräneras nu av en källa och matas via sluk. Det är svårt att säga vilket som skedde först, men en källa betyder snabbare avtappning av vattnet vilket kommer att gynna sammanväxningen av kanalerna till ett system. Ewers (1974) har konstaterat detta på samma gång som han konstaterade att grottsystem även kan utbildas i riktning från sluket.

Samtliga ostörda partier i Lummelundagrottan uppvisar klart freatiska former, de är alltså ubildade helt under vatten. Fig. 88 visar på den principiella skillnaden mellan Vadösa och freatiska gångar, figuren kan jämföras med bilderna 21 och 26. Den jämna freatiska formen tyder på att grundvattenytan varit tämligen stabil under hela den tid som gångsystemet i de kända delarna av grottan utformats. Då en grundvattenyta, sett ur längre tidsperspektiv, anses korrespondera med den lokala erosionsbasen har jag hypotetiskt markerat denna som hav i fig.88.

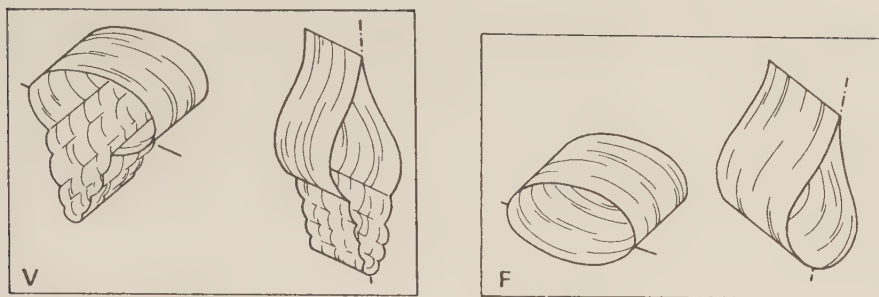


Fig. 88 Skillnaden i utseende mellan grottgångar som är utbildade under helt freatiska (F) förhållande och freatiska gångar som sedan utsätts för vadörs erosion (V). Efter Bögli 1978.

Om nu grottan har bildats under kort tidsrymd har erosionsbasens läge ingen större betydelse.

Hur stor källans öppning var i slutet av stadie 2 kan diskuteras, men det finns ingen anledning förmoda att kapaciteten var nämvärt mindre än idag med tanke på att övriga gångar i grottan inte tycks ha vidgats nämvärt sedan det freatiska stadiet. Detta utgör i och för sig ett indicium på att källan verkligen mynnat i ett hav, i annat fall skulle vattnet snabbt dränerats bort från systemet och det freatiska stadiet ha upphört.

Övergången mellan stadium 2 och 3 var förmodligen tämligen snabb. Atingen sjönk havet undan så att systemet dränerades, eller vidgades källans öppning. Vilket som än var orsaken så inträffade det för över 3 600 år sedan vilket är åldern på den äldsta ^{14}C -dateringen av travertin från en låg nivå i grottan. Den snabba sänkningen av den lokala karstvattnenytan (grundvattnenytan runt grottsystemet kan ha sänkts långsammare, men idag ligger ytorna på ungefär samma nivå, se kapitel 5) kan ha skett under loppet av några tiotal år eller ett par tusen år, beroende på orsaken till sänkningen. Att sänkningen inte gått långsammare (10 000-tals år) eller att vattenytan inte har legat stilla någon längre tidsrymd (över ca 1 000 år) bevisas av de primära gångarnas former.

Fig. 89 visar tvärprofiler från två sjöar i grottan med den nuvarande vattenytan utmärkt. Det är känt att ett långsamt strömmande vatten i öppna bassänger (vilket vattnet i sjöarna är utom vid högvatten) är mest aggressivt i ytan p g a CO_2 -utbyte med atmosfären och den lösande förmågan snabbt avtar med

djupet (Kempe 1976). Formerna på sjöarna, Sifon 1 och Skeppssalen kunde studeras när de pumpades torra sommaren 1978. Som figuren visar har båda en tydlig utvidgning kring normalvattenytan, mest framträdande är ytvattenkorrosionen i Skeppssalen vilket förmodligen beror på att salen är det största kända vattenmagasinet i grottan och på att dräneringen sker i botten, d v s omblandningen av vattnet är mindre än i de andra sjöarna. Erosionshak finns även i de andra mindre sjöarna men inte så utpräglade. Haken visar alltså att vattenytans nuvarande läge varit tämligen konstant under en längre tidsrymd, medan avsaknaden av hak på högre nivåer tyder på att vattenytan inte intagit något "mellanläge" under en längre period.

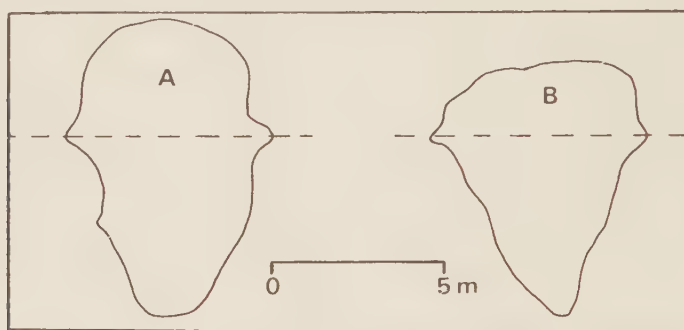


Fig. 89 Tvärprofil av två större vattenbassänger i grottan. A = Skeppssalen, B = Sifonsalen (Sifon 1). Streckad linje markerar normalvattenytan kring vilken korrosionshak bildats. Haken är något överdrivna i storlek då de mest markanta haken har avbildats.

Det vadösa stadiet (fig.87:3), som har rått i minst 3 600 år, har inte påverkat grottans form i någon större utsträckning. Utöver erosionshaken i sjöarna finns det på de platser där vattnet rinner fram som en bäck, en svag vadös erosion i tunnlarnas botten (se bild 21 och 26). I Fossila Systemet finns överhuvudtaget inga spår av vadös aktivitet annat än en liten fluvial ränna i leravlagringarna i Lergången (se bild 42).

I stadium 3 har flera slukhål markerats än i stadie 2. Det finns dock inga belägg för att sluk har bildats under det vadösa stadiet, de kan lika väl ha bildats under det freatiska stadiet. Vad jag vill markera är att när väl en underjordisk dräneringskanal etablerats kommer sluk att bildas där det finns vatten att

leda ner i underjorden. Vanligt är att nya sluk bildas uppströms de redan existerande så att dessa så småningom blir fossila.

HYPOTESER KRING UTFORMNINGEN AV VISSA PARTIER I GROTTAN

Gångarna i Aktiva Systemet är i huvudsak primära bildningar medan flera av gångarna i Fossila Systemet är sekundära, d v s de har omformats efter det att vattnet eroderat ut dem. Gångarna är i första hand ombildade genom ras och utfyllnad av sediment, enstaka partier innehåller dessutom så mäktiga kalcitutfällningar att de primära formerna döljs.

Fig.90 illustrerar hur gångarna i Fossila Systemet mestadeles har omformats. Den ursprungliga freatiska formen (R) förändras genom ras från tak och väggar. Har inga mängder med vatten passerat gången efter raset kommer gången i princip att se ut som i den mellersta figuren (S). Vanligt är dock att vatten har förekommit i gången efter raset så att de nedstörtade blocken är inbäddade i finkorniga sediment som fig.90:T visar. Har gången dessutom varit vattenförande under en längre period kan de skarpa kanterna i tak och väggar ha utjämnats via korrosion - detta har enbart iakttagits på ett fåtal ställen.

Av fig.90 framgår det hur flera av gångarna i Fossila Systemet har förflyttats uppåt efterhand som taket rasat ner. Bild 44 visar på ett extremfall där gången förflyttats ca 2 m högre upp. Bild 43 ovanför visar den enda liknande situationen i Aktiva Systemet.

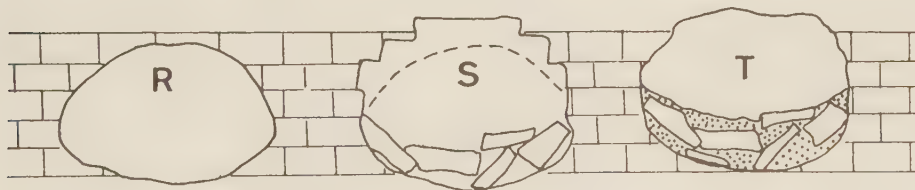


Fig.90 Grottgångarnas utveckling i Fossila Systemet. R = freatiskt formad gång. S = sedan gången torrlades skedde efterhand instörtningar av taket, gången förflyttar sig alltså uppåt. T = mellan och över de nedfallna blocken avlagras olika slag av sediment, gångformen har rundats av något p g a småras och eventuell vattenerosion.

I kapitel 10 behandlas sprickornas betydelse för gångarnas horisontella utbredning. Sprickorna har även stor betydelse för hur grottgångarna kommer att utformas i detalj. Fig.91 utgör en karta över Torget vilket är benämningen på partiet kring den fristående pelaren i figuren. I skissen har förekommande sprickor, iakttagna i tak och väggar, lagts in. Det framgår tydligt av figuren hur gångarna har bildats kring de tidigare sprickorna och att pelaren är ett resultat av tre korsande sprickor. Hur själva gångarna utformas och vilken storlek de får i en homogen kalksten bör bero på den mängd vatten som tränger ner från markytan och tillföres i sidled samt på vattnets kemiska beskaffenhet. Werner (1976) har funnit att horisontella förkastningar (ökar vattentillförseln i sidled) ger upphov till gångar som är lägre och bredare än de omgivande. Förekomsten av märgelskikt ökar också tillströmningen av vatten med större grottgångar som följd (Rauch 1974). Kalken i Lummelunda innehåller en hel del märgel i form av fickor eller lager. När kalken löses ut frigöres de partiklar i märgeln som inte utgöres av kalk och sjunker till botten. Detta sedimentskikt kommer enligt Pasini (1975) att skydda den underliggande kalken mot korrosion och han menar att detta kan vara förklaringen till oregelbundenheter i den vertikala utbredningen. Förklaringen är enbart tillämpbar när vattnet cirkulerar så långsamt att sedimenten inte förflyttas i sidled.

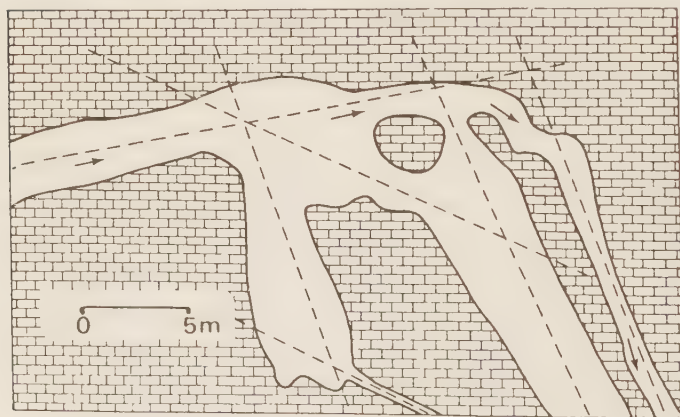


Fig.91 Gångsystemet kring Torget i Lummelundagrottan. Pilarna markerar rinnande vatten och streckade linjer markerar sprickor i tak och väggar.

En erosionsform som förekommer på förvånansvärt få ställen i grottan är s k lösningsfickor (solutional pocket, bell-chamber, Laugungskolke). De uppträder där sprickor mynnar i vattenfyllda kanaler och utgör ett av Böglis tillämpade bevis på blandningskorrosion. Varken Bögli eller någon annan har emellertid kunnat

förklara varför de enbart uppträder på vissa ställen längs kanaler som anses vara utformade just p g a det vatten som tillförts via sprickorna. Fig.92 visar en horisontalprojektion av gången Kvalet i Fossila Systemet där lösningsfickor har bildats kring korsande sprickor. Vanligare är dock fickor bildade längs de vertikala sprickorna i gångarnas tak, fig.64 illustrerar en sådan i tvärprofil. Lösningfickorna i taket varierar i längd mellan några meter och ett tiotal meter, djupet från någon dm till knappt 2 m.

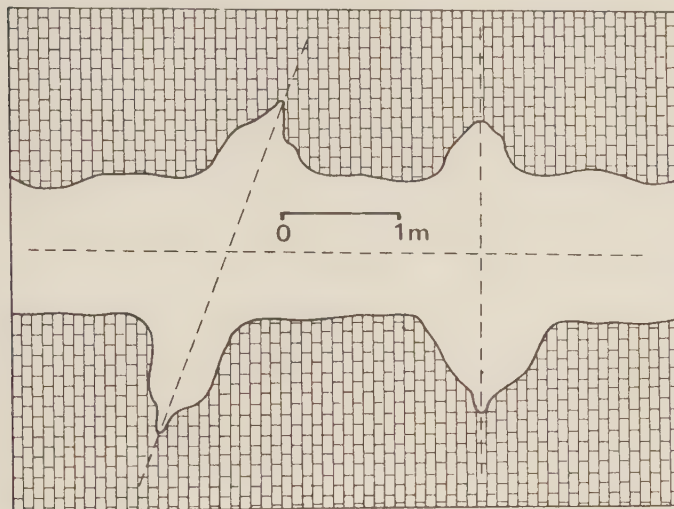


Fig.92 Lösningfickor av den typ som finns i gångarna Valet och Kvalet. Streckade linjer markerar sprickor i tak och väggar.

De flesta karstforskare har anammat Böglis teori om att lösningfickorna är ett resultat av blandningskorrosion, men Franke (1975) avvisar bestämt denna hypotes. Han hävdar istället att fickorna bildas under en glaciation (p g a CO_2 -rikt smältvatten) och menar att de skall ses som bevis för att en inlandsis har legat över grottan. Hans undersökningar har visat att en lösningficka växer mycket långsamt, på 100 000 år ökar djupet enbart med 30 cm. Tolkningen är alltså inte entydig även om Franke inte lägger fram några talande bevis för sin tolkning.

ÅLDERN PÅ LUMMELUNDAGROTTAN OCH DESS FRAMTIDA UTVECKLING

Det finns två nedtecknade uppskattningar av åldern på grottan. Lundevall (1965) menar att grottan fick sin nuvarande form i postglacial tid och då troligen efter litorinatiden d v s under

de senaste 4 000 åren. Tell (1958, 1961a, 1964) anser däremot grottan vara av preglacialt ursprung. 1961 (a) anger Tell att intialstadiet kan ligga så långt tillbaka som 300 miljoner år. Båda författarnas uppgifter får dock anses som gissningar då de inte presenterar några bevis för sina teorier. Tyvärr kan inte heller jag lägga fram några konkreta bevis för när grottan började bildas, men vissa indicier kan ge en uppfattning om minimiåldern. En vanlig metod för åldersberäkning av aktiva grottor är att mäta grottans volym och dividera den med den mängd utlöst kalk som årligen transporteras bort från systemet. Enligt resonemanget i kapitel 6 kan metoden inte tillämpas i Lummelundagrottan då mätvärdena är för få. En viss uppfattning av grottans tillväxthastighet kan dock erhållas genom att studera de vadösa formerna. Enligt dateringar av speleothems har grottan varit vadös i minst 3 600 år (kapitel 11). Trots detta har gångarna ingen vadös prägel d v s de spår som finns av vadös aktivitet är obetydliga. Frånsett erosionshaken i bassängerna har vattnet i vissa gångar eroderat sig ner 1 å 2 dm i kalken, i andra gångar igen syns inga spår av vadös erosion. Detta förhållande är viktigt för nedanstående resonemang.

I fig D är en havsyta inlagd för att illustrera grundvattenytans stabila läge under en längre tidsrymd. Nu har det funnits ett hav med en nivå som legat kring +25 m i Lummelundatrakten, Litorinahavet. Kurvorna i fig.93 visar Östersjöns nivåförändringar, i förhållande till den nuvarande havsytan, för Borgholm, Valdemarsvik och Lummelunda. Kurvan för Lummelunda har konstruerats genom att de kända nivåerna för Ancylussjön och Litorinahavet lagts in, därefter har kurvan extrapolerats fram med hjälp av de andra två kurvorna. Kurvan bör ge en bild av verkligheten mellan 4000 BP och 8000 BP. Den streckade linjen i figuren visar 25 m nivån, vid vilken större delen av grottans kända delar varit vattenfyllda. Enligt kurvan stod grottan under vatten i ca 1 200 år under litorinatiden. Mellan Litorina och Ancylus bör grottan varit lika torr som nu i ca 1 000 år (ca 6500-7500 BP). Dessförinnan bör den ha stått så djupt under vatten sedan istiden att grundvattenytan legat betydligt över den erforderliga nivån. Nu finns det inte ens en teoretisk möjlighet att grottsystemet har utbildats helt under litorinatid. Den freatiska lösningsprocessen är nämligen mycket långsam vilket bevisas bäst av den minimala vadösa erosion som skett under minst 3 600 år (eventuellt

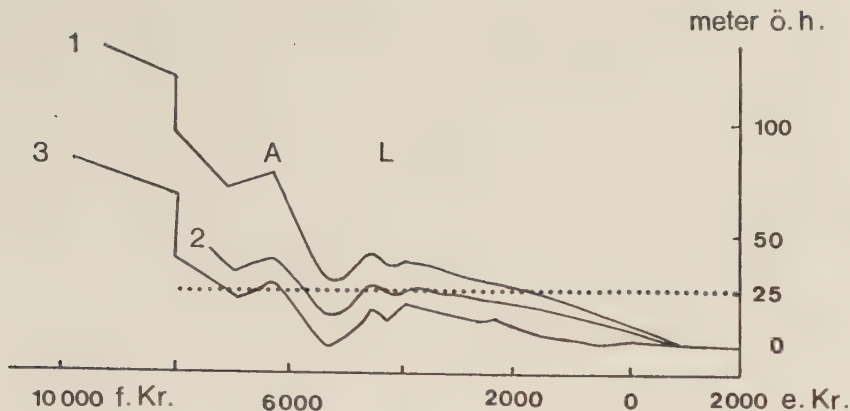


Fig. 93 Strandförskjutningskurvor för 1) Valdemarsvik, 2) Lummelunda, 3) Borgholm. 1 och 3 har hämtats från Magnusson et.al. 1963, 2 har konstruerats efter de andra två kurvorna med stöd av kända värden på anecylus- och litorinastrandlinjer (A och L). Enligt kurva 2 sjönk havet under Lummelundagrottans mynning ca 3500 f. Kr.

5 500 år om kurva 2 i fig. 93 är korrekt) trots att denna är betydligt snabbare. Ett vadöst rinnande vatten kan ju dels öka sin aggressivitet genom CO_2 -absorption från luften, dels strömmar vattnet mestadels turbulent och möjligheterna till blandningskorrosion är lika stora som i det freatiskastadiet då markvatten fortfarande leds ner i systemet via de befintliga sprickorna (det rör sig om mycket små mängder vatten som tränger in i systemet via sprickor och skiktfogar, t o m under snösmältningen, och det finns ingen anledning förmoda att vattentillförseln varit större tidigare). Möjligheten att grottan är av postglacialt ursprung är alltså liten.

En tidigare populär åsikt bland karstforskare var att de skandinaviska karstgrottorna bildades vid inlandsisens avsmältning och/eller under själva istiden (se Engh 1980). Under 1970-talet har emellertid radiometrisk datering av speleothems givit antydningar om att det inte fanns något fritt cirkulerande vatten under inlandsisen (Engh 1980). För Skandinavien del bekräftas detta genom de åsikter Marcussen (1973) och Schytt (1974) fört fram om att isen var fastfrusen vid underlaget. Efter detaljerade undersökningar av moräner på Gotland konstaterar Svantesson (1976) att isen där troligen frös fast vid underlaget på ett

tidigt stadium och förblev i detta tillstånd till deglaciationen. Det förefaller alltså inte som om det funnits ett fritt vatten under isen som kan ha bildat grottor på Gotland. Något smältvatten lär inte heller ha kunnat bidra nämvärt till utformandet av grottan p g a kravet på en fast grundvattenyta över 25 m h ö h (nuvarande), som enbart kan ha funnits när havsytan låg under denna nivå. Vidgning via aggressivt smältvatten duger inte heller som förklaring, då skulle också slukhålén ha vidgats. Ovanstående utgör inga bevis för grottans ålder men jag finner det sannolikt att stora delar av systemet var utbildade redan före den sista nedisningen. Denna bedömning bygger också på det faktum att 1970-talets dateringar av speleothems har visat att förmodade glaciala och postglaciala grottor i själva verket är av betydligt högre ålder. White Scar Cave är belägen i Yorkshire i ett glacialt präglat område. Grottan är aktiv, ungefär av samma storlek som Lummelundagrottan (det finns dock större salar i White Scar Cave) och dräneringsområdet är något mindre. Vid ett besök i grottan bedömde jag den som något äldre än Lummelundagrottan med tanke på storlek, vattentillförsel och läge. Dateringar av speleothems från White Scar Cave har visat att de flesta är av postglacial ålder, en annan grupp är ca 100 000 år gamla och en datering gav så hög ålder som 225 000 år. Waltham (1977) hänför nu grottans freatiska stadium till preglacialt ursprung. Lummelundagrottans storlek talar alltså inte emot en hög ålder, snarare tvärtom med tanke på att den freatiska utformningen förmodas ske mycket långsamt.

"A correlation of karst caves with river terraces is one of the important and intricate problems" säger Kiknadze 1973.

Trots att det onekligen är ett intressant ämne har det berörts av relativt få författare. Kiknadze namnger 21 öststatsforskare som arbetat med dylika korrelationer, i väst verkar det som om färre än så har ägnat sig åt det.

De samband som vanligtvis fastställts är mellan fossila flodterrasser och sammanhängande erosionsnivåer i grottor, Droppa (1966) har t ex kunnat korrelera nio sådana nivåer för ett större grottsystem i Tjeckoslovakien. I Lummelunda är det havet som utgör den lokala erosionsbasen och den enda relevanta nivå som kan diskuteras är ca 25 m ö h. Denna tidigare grundvattenyta bör ha varit stabil under en lång tidsperiod för att grottan skall ha

utbildats. Enligt resonemanget tidigare förefaller denna tidsperiod att ha inträffat under den sista interglacialen eller tidigare.

Grottan mynnar ut i basen av en landklint på ca 22 m nivå.

Klinten är mera utpräglad i den norra delen av det undersökta området och basen ligger där mellan 21 och 25 m h ö h. När bildades denna klint, hur bildades den och finns det flera på Gotland? En sammanställning av landklintar på Ön ger följande resultat (höjder inom parentes är hämtade från topografiska kartan, övriga från barometeravvägning):

1. Hoburgen N + E-sida, ca 23 m. 100 m till nuvarande kust.
2. Hoburg E-sida, 11-15 m. 1 km till kust.
3. Nackstahajd (20-25 m). 500 till kust.
4. Haug klintar (20-25 m). 500 till kust.
5. Klinte 25-26 m . 2,5 km till kust.
6. Linde - Lojsta - Etelhem, många hak på (35-40 m).
7. Östergarnberget W + N-sida, ca 20 m, E-sida (10-15 m).
5 km till kust.
8. Klinteklint, ca 15 m. 1,5 km till kust.
9. Torsburgen, ca 30 m. 5 km till kust.
10. Brissund, ca 15 m. 500 m till kust.
11. Lummelunda, 21-25 m. 400 m till kust.
12. Grönbjärsklint, ca 23 m. 600 m till kust
13. Järnklinten, 19-23 m. 800 m till kust.

Basen på sju av erosionshaken är belägen mellan 19 och 26 m ö h, och haken ligger mellan 0,1 och 2,5 km från nuvarande kustlinje. Rudberg (1967) finner det inte omöjligt att den nuvarande aktiva kustklinten är av postglacialt ursprung, men han menar också att den kan ha sitt ursprung från mindre preglaciala klintformer. Tillämpas Rudbergs mått på klintregressionen, 30-40 m på ca 7 000 år (eventuellt 60-85% mera), på de ovan nämnda landbundna formerna finner man att de bör tillskrivas preglacialt (pre-wiechselianskt) ursprung. Dateringen bygger på bredden av den nederoderade plattformen, som finns framför respektive klint, oftast lika med avståndet till havet. Rudberg anser inte att den glaciala skulptureringen varit av någon större betydelse för klinternas utformande, detta bestyrkes av Svantessons (1976) teori om att isen under större delen av sin tillvaro var fastfrusen vid underlaget. Landklintarna kan alltså mycket väl svara mot

preglaciala havsnivåer även om de omformats av inlandsisen och av senare hav.

De sju landklintar som har en bas på mellan 19 och 26 m ö h kan korrespondera med den hypotetiska erosionsbasen vid Lummelunda likaväl som denna erosionsbas kan vara interglacial eller preglacial. Fastare slutsatser än så här går inte att dra då egentliga bevis saknas.

Om erosionsbasen och det ovanjordiska dräneringssystemet förblir relativt oförändrade kan två alternativa eller kompletterande utvecklingar av grottan i framtiden skisseras. Modellerna bygger på iakttagelser av grottor i olika utvecklingsstadier i USA, Europa och Asien.

1. Den vadösa utvecklingen fortskrider så att grottan successivt skär sig ner i berggrunden. Resultatet blir en hög och smal grotta (den vanligaste typen av karstgrottor i fjällen).
2. De karstvattenkanaler som finns under Lummelundagrottans nivå (deras existens bevisas av källor på lägre nivåer) kommer att vidgas så att de så småningom övertar dräneringen av berggrunden. Även Lummelundaströmmen kommer att söka sig ner till detta nya dräneringssystem, den nuvarande grottan blir därmed ett övre fossilt parti i den nya grottan. På detta sätt kommer grottan att söka sig allt längre ner i altitud tills dess lägre delar ligger i nivå med den dåvarande erosionsbasen.

De ringa förändringar som skett i grottan under de sista årtusendena tyder på att det behövs 10 000-tals år för att en påtaglig förändring skall ske. En annan och kanske mera trolig utveckling är därför att grottan blir fossil inom kort p g a ökad reglering av Lummelundaströmmen, tilltäppta sluk och ökat grundvattenuttag.

16. SAMMANFATTANDE DISKUSSION - SLUTSATSER

DE STORA PROBLEMSTÄLLNINGARNA INOM KARSTFORSKNINGEN

Redan 1893 presenterade Cvijic sitt för karstforskningen grundläggande verk "Das Karstphänomen" som huvudsakligen behandlade karstmorfologin. Från sekelskiftet fram till slutet av 1930-talet var det dock framför allt karsthydrologin som kom att dominera debatten. 1936 publicerade Lehman en avhandling om karstmorfologi på Java. Denna avhandling fick en epokgörande betydelse. Förutom att karstmorfologin som sådan gavs en framträdande plats behandlades klimatets betydelse för morfologin. Denna problemställning, klimatmorfologin, kom att diskuteras intensivt under 1950- och 1960-talet. Under 1960- och 1970-talet kom processforskningen att dominera, bl a ägnades denudationshastigheten stort intresse. I klimatmorfologin hänfördes olika karst- och landformer till speciella klimatregioner. När resultat från processforskningen började spridas kom dessa att kopplas till klimatmorfologin, främst då av Corbel. Till debatten om klimatmorfologiska regioner lades nu diskussionen om denudationshastigheten i skilda klimat. De flesta författare som tog ställning ansåg att denudationen är snabbast i tropiska områden, motsatta åsikter framfördes främst av Corbel som ansåg att denudationen är störst i arktiska områden.

De optimistiska tongångarna, när det gällde indelning efter klimatregioner av former och processhastighet, har avtagit starkt under 1970-talet. Problemen anses numera inte så enkla och alltflera författare börjar ifrågasätta slutsatserna från de senaste årtiondena.

KEMISK DENUDATION

Föreliggande avhandling visar att uppkomsten av karstformer vid Lummelunds bruk snarare har styrts av petrologin än av klimatet. Detta styrkes av fältexperiment utförda av Trudgill (1976), samt av Sweeting (1976) som har gjort globala jämförelser. Dessutom visar föreliggande resultat från Lummelunda tillsammans med Helldéns (1974) att temperaturen är av underordnad betydelse för denudationshastigheten i jämförelse med nederbörds- och avrinningsförhållanden. Detta framhålles också av Smith & Atkinson (1976) som har databehandlat ett omfattande material från skilda klimatområden. De har därvid inte funnit någon signifikant skillnad i korrosionshastighet mellan tropisk, tempererad och arktisk/alpin karst. Deras utgångsdata är redovisade i tab. 11. När värdet från Lummelunda ($13,1 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{år}$) jämföres med värdena i tabellen framgår det hur låg denudationen på Gotland är. Vid jämförelse mellan resultaten från Gotland och Lappland framgår det att den effektiva avrinningen är avgörande för denudationshastigheten. Med tanke på att Lummelundaströmmen har ett högt värde på hårdheten (245-578 ppm, jämför 211 ppm i medeltal för tempererade områden enl Smith & Atkinson 1976) är det troligt att avrinningen verkligen utgör en betydande faktor. Faktorer som petrologi, exponeringstid, jordtäckte, vegetation, temperatur och nederbördens art är av betydelse för hur mycket kalk som går i lösning, men fallstudien Lummelunda visar att avrinningen där betyder mera för landskapets denudation. Då avrinningen i sin tur beror på nederbörden och evapotranspirationen är det dessa två faktorer som har störst betydelse.

KARSTMORFOLOGI - KLIMAT

Den klimatiska karstmorfologin har under 1970-talet utsatts för kraftiga angrepp av främst Derek Ford som påvisat "storslagna tropiska karstformer" i Kanada (sammanfattning i Brook 1977 och Brook & Ford 1977). Helldéns arbete (1974) indikerar också att välutvecklad karst kan uppträda i subarktiska områden. De morfometriska analyserna i Artfjället och på Gotland visar båda på en ungefär lika hög grad av karstifiering där formerna i Lappland t o m är något mera välutvecklade. Dessa undersökningar

Tab. 11. Hastighet på kemisk denudation. En litteratursammanställning av Smith & Atkinson 1976.

Locality	Erosion rates (m ³ /km ² /year)	Source
TEMPERATE ZONE		
British Isles:		
Derbyshire	115; 136; 42; 128; 73; 98; 24; 121; 111; 108; 193 77 79 60	Pitty, 1968 Dearden, 1963 Douglas, 1964 Ford, 1966
Mendip Hills	81	Atkinson, unpublished
N. W. Yorkshire	83	Sweeting, 1966
R. Mellte, South Wales	16	Groom and Williams, 1965
R. Frome, Dorset	60	Casey, 1969
N. W. Scotland	100; 88; 96	Smith, unpublished
R. Fergus, Eire	51	Williams, 1968
Europe:		
Yugoslavia	109; 66; 93; 66; 55; 58; 66; 48; 90; 28; 14	Corbel, 1965
Dinaric Karst, Yugoslavia	43; 43; 63; 55; 64; 19; 56; 59; 64; 37; 42; 44; 9; 72; 126	
Joux Valley, Swiss Jura Mountains	98	Aubert, 1967, 1969
Krakow Plateau, Poland	20 21	Corbel, 1965 Oleksynowa and coworkers, 1971
Tatra Mountains, Poland	95; 86 50	Pulina, 1971 Kotarba, 1971
R. Punkva, Czecho- slavakia	25	Oleksynowa and coworker, 1971
Aggtelek, Hungary	20	Stelc and coworkers, 1969
R. San Antonio, Texas, USA	4	Balazs, 1973b
E. Siberia, USSR	32; 6; 1; 4	Corbel, 1971
Australia: Cookman Plain, N. S. W.	24	Pulina, 1968 Jennings, 1972a, 1972b.
TROPICAL ZONE		
Locality	Erosion rates (m ³ /km ² /year)	Source
Indonesia	63; 99; 86; 83	Balazs, 1971
Florida	35 5; 8	Runnels, 1971 Corbel, 1959b
Jamaica, West Indies	69; 39; 86; 96	Smith, 1969, 1970
Puerto Rico	42	Corbel, 1971
Yucatan, Mexico	30; 16	Corbel, 1959b
ARCTIC/ALPINE ZONE		
Locality	Erosion rates (m ³ /km ² /year)	Source
Alaska	530 40; 8	Corbel, 1959a Corbel, 1959b
Canada: Somerset Island, Great Bear Lake	2 7	Smith, 1972a Corbel, 1959b
Spitsbergen	320; 16 30	Corbel, 1960 Corbel, 1959b
Yugoslavia	47; 83; 82; 60; 90; 79; 93; 77; 83; 104; 104 129	Gams, 1969, 1972 Corbel, 1965
Tatra Mountain, Poland	96 36; 38	Corbel, 1965 Kotarba, 1971

stöder alltså inte teorin om att ytkarstfenomenen blir färre och minskar i storlek med ökad latitud.

KARSTHYDROLOGI

Helldén (1974) redogör för två skolor inom karsthydrologin. Davies skola: "Det finns en grundvattenyta kring vilken den maximala erosionen äger rum. Grundvattenytans fluktuationer är beroende på erosionsbasen". Lehmans skola: "Karsthydrografiska hålrum bildar system av kommunicerande kärl där vattnet följer de hydrostatiska lagarna och en "normal" plan grundvattenyta saknas".

Lummelundagrottan är närmast att se som ett typexempel på den förstnämnda skolan. Detta är intressant då övriga större karstgrottor i Skandinavien närmast passar in på Lehmans teorier. Helldén framför en hypotes om att de två skolorna i själva verket behandlar områden med olika geologiska förhållanden. D v s att Davies teorier är tillämplbara i låglandskarst (ostörd lagrad kalk) medan Lehmans skola gäller för bergskarst (störda oftast veckade kalklager). Lummelundagrottan är utbildad i låglandskarst till skillnad mot övriga större skandinaviska karstgrottor som uppträder i veckad kalk.

Jag har i kapitlen 7-15 försökt påvisa att en grotta inte enbart är att se som ett karsthydrologiskt problem - det är nämligen så karstgrottor främst har behandlats i Skandinavien. Minst lika väsentlig är grottan som fysisk företeelse med sina avlagringar, sitt biologiska innehåll och klimat. Här kan betydande information erhållas om t ex landskapets utveckling, paleoklimat eller biologisk evolution och migration.

KARSTOMRÅDET LUMMELUNDS BRUK I SAMMANDRAG

Delar av området har varit starkt präglade av kustprocesser där strandvallar, klint och abrasionsnischer fortfarande vittnar om denna tid. Numera är det den kemiska vittringen som präglar landskapet. Karstformerna i området uppträder främst i Högklintseriens kalkstenar. I den blottade revkalcken har enbart lösnings-

doliner bildats. Där lagrad kalk är exponerad för nederbörden uppträder sprickkarren. Dessa karrenformer uppträder rikligt både på Öland och Gotland i flera olika typer av lagrad kalksten.

Vattnet i Lummelundaströmmen nedströms Martebo myr är sällan aggressivt utan mestadeles mättat på kalk. Detta anses bero på de speciella jordartsbetingelser som råder i den uppodlade delen av myren. Totalhårdheten mätt i CaCO_3 varierar mellan 245 och 578 ppm vilket är mycket höga värden. Den lösta kalken, ca $860 \text{ m}^3/\text{år}$, transporteras huvudsakligen bort under oktober-april (836 m^3 mot 25 m^3 under sommarmånaderna).

Totalhårdheten i Lummelundatrömmen förefaller att vara omvänt beroende av vattenföringen när denna ligger mellan 0-25 l/s. Mellan 50-1 000 l/s verkar hårdheten att ligga kring 275 ppm oberoende av vattenföringens variationer.

Karstområdet har en hög permeabilitet och ett väl utvecklat underjordiskt dräneringssystem med dendritiskt mönster, d v s många sluk och få källor. Grundvattenytan i området lutar flackt mot kusten från Martebo myr. Vid landklinten sänks emellertid nivån abrupt. Den högre liggande grundvattenytans nivå korresponderar med nivån på vattenytorna i Lummelundagrottan. Något större tillskott av grundvatten till Lummelundaströmmens underjordiska delar har emellertid inte påvisats.

Sammanlagt visar karstformerna och dräneringen att området är karstifierat i hög grad. Depressionstätheten är stor vid jämförelse med karst från andra klimatområden men formerna är små. Den kemiska denudationen i Lummelunda är ovanligt liten jämförd med denudationen i andra karstlandskap i olika delar av världen. Detta beror förmodligen på en ringa avrinning i förhållande till det stora dräneringsområdet.

Lummelundagrottan har bildats strax under en äldre grundvattenyta belägen minst tre meter över den nuvarandes nivå. Grottan har till största delen utbildats under freatiska förhållanden och är en "watertable cave". Grottan förefaller att i huvudsak fått sitt nuvarande utseende före eller under den sista nedisningen. Den erosionsbas grottan svarar mot tycks återfinnas på flera håll på Gotland och kan eventuellt utgöra en preglacial sådan.

Grottgångarna har huvudsakligen utbildats kring sprickor. Gångar

och sprickor är orienterade i tre riktningar. Två av dessa sammanfaller med orienteringen av karstsprickor på två undersökta platser på Gotland. Den tredje riktningen sammanfaller med orienteringen av en av två grupper lineament iakttagna i satellitbild.

Stora delar av grottsystemet är ännu okända. Undersökningarna tyder dock på att det vattenförande gångsystemet är komplext och att det dels har en E-W och dels en NE-SW utbredning mot de kända delarnas sträckning i N-S.

Grottan innehåller rikligast kända förekomst och variation av speleothems i Sverige. Åtskilliga avlagringar har sådan form och utbredning att de kan användas för bestämning av t ex paleoklimat. Alloktona sediment uppträder rikligt i grottans fossila delar. Sedimentens utbredning och förekomst av sediment varvad med travertin tyder på att delar av grottan varit omväxlande torra och vattenförande med långa tidsmellanrum. Detta går inte att förklara med kända förhållande om nederbörd och nivåförändringar av havsytan.

Klimatet i grottan är förhållandevis stabilt med en liten amplitud i temperatur och luftfuktighet. Variationerna är främst beroende på det genomrinnande vattnet.

I grottan har 83 djurarter noterats. Av dessa är 13 arter troglofila och mer eller mindre anpassade till ett liv i grottmiljö.

17. SUMMARY

1. INTRODUCTION

In Sweden there are many small areas of limestone, just a few km² each, and some larger ones, e g Öland and Gotland. Karst landforms do occur where the bedrock is exposed or covered with thin layers of sediments. Most of the research on karst features in Sweden has been carried out during the last two decades and still little is known about karst in Scandinavia.

The purpose of this thesis is:

To compile all relevant facts for the Lummelunda karst area.

To give descriptive and analytical information about the geomorphology, the hydrology and the evolution of the area and about the climate, the deposits and the biological content in the cave.

To make a brief summary of recent speleological literature based on the case study of Lummelunda.

2. THE LUMMELUNDA KARST AREA

The climate of the area is of Cfb type (according to Köppen 1936).

Average annual precipitation is 554 mm/year and the mean annual temperature is +7,1°C.

The area (0,9 km²) is situated in the downstream parts of a 68 km² large drainage basin in which the central parts consist of a cultivated mire.

The bedrock consists of reef, crinoidal and of almost horizontal layered limestone of Silurian age.

3. COSTAL FORMS

In the area there are several traces of wave-activity in post

glacial time. Raised beaches from *Ancylus* and *Litorina* times do occur. In the fossil coastal cliff there are many caves and cavities cut out by waves.

4. KARST LANDFORMS

In the area of 0,9 km², there are 49 solutional dolines, 4 alluvial dolines, 33 swallets, 6 karst springs and at least 1 karst cave, some small dry vallies also exist. Two karst windows and some grikes are known in the area. All features have developed in the Högklint limestone.

5. HYDROLOGY

The Lummelunda stream has an average annual flow of 259 l/s. From May to September however the flow seldom exceeds 10 l/s. Most of the year the stream disappears in swallets and rises again after 1 150 m (as the crow flies) in the exit of the Lummelunda cave. Some of the sinks in the west part probably lead to an other cave system.

The capacity of the swallets has changed from 5,5 m³/s to 1,7 m³/s in less then 30 years because of the obstruction by debris.

The underground drainage system through the cave is situated on the top of the inclined groundwater table (Fig.23B), and it is developed as a normal dendritical surface drainage pattern. The permeability in the area is high.

6. THE SOLUTIONAL EROSION AND MORPHOMETRICAL ANALYSES

Hydrochemical analyses have been carried out in the Lummelunda stream. The hardness in the water varies from 245 ppm (winter) to 578 ppm (summer). Totally 890 m³ of limestone is carried away annually from the 68 km² large drainage area. This gives a rate of the solutional erosion of 13,1 mm/1 000 year. A morphometrical analys based on the dolines gives a rate of the solutional erosion between 2 and 25 mm/1 000 year.

Morphometrical analyses on hydrological and morphological parameters are compared with analyses from a mountain area in Lappland, Sweden. The rate of solutional erosion in Lappland is twice

the rate in Lummelunda. In Lummelunda there are more swallets ($38,9/\text{km}^2$) and risings ($6,6/\text{km}^2$) than in the northern karst area. The depression density is high in both areas (57 and $59/\text{km}^2$) but the size of the depressions are in neither case not so impressive (appr. medium area 60 m^2). The depressions are dolines and swallets.

On the basis of the morphometrical analyses the Lummelunda karst area can be described as highly karstified.

Six new parameters are suggested to complete the morphometrical analyses worked out by Williams and Helldén (Helldén 1974).

THE LUMMELUNDA CAVE

7. HISTORY AND TOURISM

Exploration of the cave has been going on during the last 50 years. Until 1980 2 430 m of cave passages have been mapped (longest in Sweden), but this is probably only 50% of the total length. In 1960 a part of the cave was opened for tourism. The show cave, only 100 m long, is during the summer visited by more than 100 000 tourists. Two man-made tunnels (Fig.41) give access to the show cave.

8. SURVEYING OF THE CAVES, METHODS AND EQUIPMENT

The cave has been surveyed with high accuracy, the main passage in UIS-grade 7 and other parts in grade 5. Cross sections of cave passages have been measured by a special photographic mappingdevice (picture 17 and 18).

A radio device of about 2 KHz has been used to determine the cave system on the surface. The accuracy seems to be less than 1 m, transmitting through 20 m of bedrock.

An electromagnetic device, named "slingram", has been used to localize unknown underground water passages from the surface with good results. A method for mapping caves by TV-equipment through drilling holes is presented.

A short summary of known methods for cave detecting is given.

9. MORPHOLOGY AND EXTENSION OF THE CAVE

The cave is originally formed as a water table cave but today it acts as a vadose cave. There is one system of active passages where the Lummelunda stream forks into at least 2 channels. Those active tubes are 2-5 m wide and 1-4 m high. Fig.42 shows a vertical projection of the active passages. Fig.41 is a map of the horizontal extension of the known passages. To the right in the map there is a system of fossil cave passages. Those are narrow crawl passages, situated 1-3 m higher in altitude than the active ones. This system has a maze-character (labyrinth cave). The known extension of the cave is shown in fig.48. Marked on the map are also the presumed extensions from the known parts to the swallets situated at B and C.

10. THE GEOLOGY OF THE CAVE

The Silurian limestone is gently dipping towards SE. The cave and most of the other karst features are developed in the Högklint formation (Fig.51). The outer part of the cave are cut in reef limestone and the rest of the passages in crinoidal or horizontally layered limestone. Passages cut in the latter are formed like smooth "railway" tunnels, the other passages are very irregular in form and collapses are common features. Collapses seldom occur in the active passages in the laminated limestone. The orientation of the cave passages correspond with the orientation of the observed joints in the cave. A further comparison with joints in two pavement areas, and with lineaments in a Landsat registration showed a significant similarity in orientation.

11. SPELEOTHEMS

No other cave in Sweden has so many and such a variety of speleothems as the Lummelunda cave. There are about 3 000 stalactites and 210 m² of flowstone. The stalactites are mostly straws from a few cm in length to 86cm. Other speleothems are: Stalagmites, columns, draperies, helictites, moonmilk, rimstone, lily pads and subaquatic "popcorns".

All speleothems consist of calcite.

12. SEDIMENTS

The cave holds a lot of allochthonous sediments, from clay to coarse sand, some sludge has also been found. Most of the accumulations are deposited in the fossil part of the cave. The stratigraphy is very complicated and no connections have been found between the beddings in different accumulations (see e g Fig.68). The autochthonous sediment consists of clay and rock breakdown. The latter does only occur in the fossil passages and where the cave cuts through reef or crinoidal limestone. No evidence of early man has been found in the cave.

13. SPELEOCLIMATE

The outer show part of the cave is dynamical with an amplitude in temperature between +10,5 and +5,0°C and in relative humidity between 95 and 100%. The wind between the artificial and the natural opening is stronger than in other parts of the cave. The inner cave passages are of statodynamical character with almost no winds in the active parts. "Spelean breath" does occur in the narrow fossil maze passages. The temperature fluctuates between +3,5 and 8,0°C, relative humidity between 97 and 100%. The annual mean temperature of the cave is around 7°C. Fluctuations are due to the water running through the system. Although the show cave is visited by more than 100 000 people during the summer the influence on the speleoclimate is small.

14. BIOSPELEOLOGY

83 species of macrofauna have been found. Most of the animals live in or near the water. 13 species are troglaphiles and show signs of troglobiont character. Fishes and bats are the largest animals.

Algae, mosses and lichens are common near the entrance, and in the show cave, especially on the illuminated speleothems. Even an adult species of fern grows there.

The fauna is listed in "Bilaga 3".

15. KARST CAVES - GENESIS AND EVOLUTION

A condensed genetical and descriptive system for classification of karst caves is suggested:

- A. Hydrological status: 1) Active 2) Intermittent 3) Fossil
- B. Hydrogenesis: 1) Phreatic 2) Vadose 3) Watertable
- C. Relation to surface drainage: 1) Closed 2) Open 2a) Influent cave 2b) Effluent cave 2c) Through cave

All until 1980 known factors that can be involved in the subterranean solution of limestone are put together (with references).

A hypothesis about the evolution of the Lummelunda cave is discussed (Fig.87). The cave is a watertable cave and the vertical extension is restricted by a watertable that has been at least 3 m above the present level. The horizontal extension is strictly controlled by joints.

The cave is probably not of post glacial origin or of glacial origin. There are however no strong evidences that the cave is of pre Weichselian origin but some levels of preglacial cliff coast on Gotland support the hypothesis.

BILAGOR

BILAGA 1

Till följande personer vill jag rikta ett varmt och uppriktigt tack för all den hjälp jag erhållit under mitt arbete, utan denna hjälp hade det helt enkelt inte blivit någon avhandling.

Medlemmar i Sveriges Speleolog Förbund

- | | |
|--------------------|---|
| Harriett Jasinski, | som varit min personliga assistent under hela fältarbetet såväl ovan som under jord. |
| Lars-Erik Aström, | som stött mig under hela arbetet med råd och idéer, som koordinerat karteringsverksamheten och som slutligen kritiskt har granskat manuskriptet. |
| Anders Lindén, | som karterat frenetiskt, ritat kartor och hjälpt till med geologin. |
| Rolf Engh, | som grävt sig fram genom grottans sedimentpackar, analyserat och kartlagt dem. |
| Bill Odell, | som kartlagt allt levande i grottan och hjälpt till med geologin. |
| Mischa Gavrjusjov, | som med kameran och blixstens hjälp dokumenterat allt jag pekat på och mera därtill, och som tillbringat dagar i fotolabbet för att ta fram de flesta bilder som finns i denna publikation. |
| Bo Lenander, | som radiopejlat grottan och tillsammans med Ulla Pettersson och Richard Årlin utgjort det flitigaste karteringsgänget i grottan. |
| Åke Thorsén, | som stått bak teodoliten i vått och torrt och som ibland i sin karteringsiver fastnat i trånga gångar. |

Följande speleologer har hjälpt till i minst lika stor utsträckning som ovanstående vid karteringen eller vid de olika delundersökningarna:

Ulla Pettersson	Richard Årlin	Sven Gunvall
Christina Tillö	Ola Palm	Lena Åhrén
Åke Christensson	Sören Larsson	Jan Myrbäck
Lisbeth Ivarsson	Ackil Berggren	Bo Gustafsson
Karin Magnusson	Richard Lindén	Norman Bowden
Hans Törnsäter	Gunnar Byström	Sven Ingmar Gidlund
Claes Lagerström	Johan Jansson	Jonas Ekstrand
Lars Söderberg	Lars Kjerrström	Gunnar Herndahl
Pia Herndahl	Hedwig Holmberg	Sten Lindblom
Dag Öhrström	Annika Sander	Seth Jansson
Rabbe Sjöberg		

Från Naturgeografiska institutionen i Lund:

Anders Rapp,	som varit min handledare och som kritiskt har granskat mitt manuskript.
Ulf Helldén,	som bistått med goda råd och kritik under arbetets gång.
Klara Lazslo,	som med stort tålamod och med stor skicklighet renritat de flesta av mina figurer.
Rezsö Lazslo,	som genom sitt skickliga reproarbete och annat fotografiskt arbete alltid lyckats tillgodose mina många gånger knepiga önskemål.

Följande av institutionens studenter har varit med på Gotland och hjälpt till med fältarbetet:

Rolf Nyberg	Lennart Olsson	Sven Erik Andersson
Jan Jörgensson	Björn Gagner	

Från Gotland:

Här vill jag tacka för all den hjälp, av skiftande slag, som vi erhållit på ön, allt från husrum till lån av pumpar.

Fam.K.G.Kjällgren	Stig och Karin Pettersson	Gunnar Ödin
Thomas Ardin	AB Lummelundagrottorna	Nymans entreprenad
Torgny Andersson	Länsstyrelsens naturvårds-	Lantmäteriet
	enhet	

BILAGA 2

Resultat av hydrokemiska analyser utförda i Lummelundaströmmen

Tabell A. Inloppet = slukhål C:3

Datum	t°C	CaCO ₃ mg/l	°d	Trp. g/s	pH	Q l/s
1977						
27.5	9,0	535	29,96	4,65	8,0	8,7
28.5	9,0	522	29,23	3,75	8,0	7,2
29.5	9,5	534	29,90	2,83	8,1	5,3
30.5	10,5	576	32,25	2,82	8,2	4,9
31.5	9,5	578	32,36	3,00	8,15	5,2
11.6	13,5	552	30,91	4,47	8,2	7,3
12.6	13,5	527	29,51	3,64	8,0	6,9
13.6	14,0	520	29,12	3,51	8,2	6,9
14.6	13,0	505	28,28	3,84	8,0	7,6
15.6	15,0	523	29,79	5,64	7,8	10,8
16.6	14,5	517	28,95	5,17	7,8	10,0
17.6	15,5	502	28,11	4,81	7,7	9,6
18.6	15,5	483	27,04	7,24	7,4	15,0
19.6	15,0	491	27,49	4,91	7,5	10,1
2.10	9,0	263	14,72	18,40	8,0	70
2.10	8,4	260	14,59	22,09	8,1	85
2.10	7,5	264	14,78	30,35	8,1	115
3.10	7,0	256	14,33	31,98	7,4	125
4.10	9,5	958	14,44	16,76	8,1	65
5.10	11,0	255	14,28	34,41	8,0	135
5.10	10,5	254	14,22	38,08	7,9	150
6.10	10,0	245	13,72	26,93	7,7	110
7.10	7,5	264	14,78	21,11	7,9	80
8.10	9,5	268	15,01	22,77	8,1	85
9.10	9,5	277	15,51	20,76	7,5	75
10.10	10,5	283	15,85	19,80	8,0	70
21.11	8,5	265	14,84	317,9	7,7	1250
22.11	8,0	275	15,4	274,9	7,7	1000
23.11	7,5	269	15,06	242,0	7,6	870
24.11	7,5	271	15,18	325,1	7,6	1200
25.11	5,0	276	15,46	386,2	7,6	1350
1978						
4.9	11,2	450	25,20	9,90	7,8	22
5.9	10,0	424	23,74	10,18	7,7	24
6.9	13,4	424	23,74	8,48	7,5	20
7.9	11,8	440	24,64	9,68	7,5	22
8.9	12,3	475	26,60	7,13	7,6	15
9.9	8,1	476	26,66	8,09	7,7	17
10.4	2,3	278	15,57	61,16	7,5	220
11.4	2,8	265	14,84	92,75	7,5	350
12.4	3,0	273	15,29	88,73	7,5	325
14.4	2,8	263	14,73	82,85	7,4	315
15.4	2,1	269	15,06	143,92	7,3	535
16.4	2,0	273	15,29	218,40	7,3	800
17.4	2,0	270	15,12	218,70	7,3	810
24.3	0,5	410	22,96	331,3	7,3	930
25.3	0,5	408	22,85	530,4	7,3	1300
26.3	1,0	300	16,80	1140,0	7,2	3800

Tabell B. Utloppet = Lummelundagrottans mynning

Datum	t °C	CaCO ₃ mg/l	°d	Trp. g/s	pH	Q l/s
<u>1977</u>						
27.5	7,0	522	29,23	4,33	7,6	8,3
28.5	7,0	510	28,56	3,82	7,8	7,5
29.5	7,5	517	28,95	3,20	7,8	6,2
30.5	7,0	565	31,64	3,05	8,05	5,4
31.5	7,5	559	31,30	3,24	8,05	5,8
11.6	7,5	558	31,25	4,35	8,1	7,8
12.6	7,5	522	29,23	3,76	7,95	7,2
13.6	7,5	529	29,62	3,97	7,9	7,5
14.6	7,5	480	26,88	3,98	7,6	8,3
15.6	8,0	511	28,60	5,56	7,65	10,9
16.6	8,0	508	28,44	5,23	7,7	10,1
17.6	8,0	513	28,72	5,28	7,55	10,3
18.6	8,0	467	26,15	10,9	7,3	23,5
19.6	8,0	482	26,99	8,43	7,3	17,5
2.10	8,0	269	15,06	10,76	8,0	40
2.10	7,5	289	16,18	17,33	8,05	60
2.10	7,5	276	15,45	28,95	8,1	105
3.10	7,0	270	15,12	37,78	7,25	140
4.10	8,0	273	15,29	25,92	7,5	95
5.10	8,0	273	15,29	20,47	7,5	75
5.10	8,5	274	13,34	34,24	7,7	125
6.10	8,0	260	14,56	42,54	7,35	160
7.10	8,0	269	15,06	26,89	7,55	100
8.10	8,0	271	15,18	18,96	7,6	70
9.10	8,0	277	15,51	19,38	7,6	70
10.10	7,5	284	15,90	17,03	7,6	60
21.11	8,0	273	15,28	327,5	7,65	1200
22.11	8,5	281	15,74	280,9	7,7	1000
23.11	7,0	274	15,34	246,5	7,65	900
24.11	7,0	282	15,79	338,3	7,6	1200
25.11	6,0	286	16,02	400,2	7,6	1400
<u>1978</u>						
4.9	7,4	451	25,26	9,92	8,0	22
5.9	7,4	475	26,60	7,13	7,7	15
6.9	7,5	426	23,86	10,65	-7,6	25
7.9	7,4	445	24,92	10,68	-7,7	24
8.9	7,4	521	29,18	9,38	7,8	18
9.9	7,4	524	29,34	11,00	7,8	21
10.4	6,8	285	15,96	59,85	7,7	210
11.4	6,8	274	15,34	79,46	7,7	290
12.4	7,0	280	15,68	96,60	7,7	345
14.4	6,9	275	15,4	85,25	7,5	310
15.4	7,0	270	15,12	140,40	7,4	520
16.4	5,3	268	15,00	213,33	7,3	795
17.4	4,8	265	14,84	201,40	7,4	760
24.3	3,5	355	19,88	49,70	7,3	140
25.3	3,5	375	21,0	67,50	7,1	180
26.3	3,0	355	19,88	248,5	7,1	700

BILAGA 3

Inventeringslista av makrofaunan i Lummelundagrottan. Baserad på iakttagna levande individer under 1976-77. Förekomst markeras med +.

ART	ANTAL:STATION	TOTALT
<u>Porifera (svampdjur):</u>		
<i>Spongilla lacustris</i>	+2, +4	
<u>Platyhelminthes (plattmaskar):</u>		
<i>Planaria torva</i>	6:2, 1:4, 3:5, 1:16, 2:19, 2:20, 1:21	16
<i>Bdellocephala punctata</i>	7:1, 5:2, 1:4, 1:5	14
<i>Crenobia alpina</i>	3:4, 1:15, 1:19	5
<i>Polycelis tenuis</i>	2:4	2
<u>Annelida (ringmaskar):</u>		
<i>Tubifex barbatus</i>	+1, +2, +5, +15, +19, +22	
<i>Tubifex tubifex</i>	+1, +2	
<i>Enchytraeus albidus</i>	2:6	2
<i>Chaetogaster diaphanus</i>	3:4	3
<i>Stylodrilus heringianus</i>	2:1	2
<i>Lumbricus rubellus</i>	3:9, 31:10, 27:13, 6:14, 19:17, 8:25, 26:26, 37:28 10:30	167
<i>Lumbriculus variegata</i>	4:5, 16:20, 8:22, 10:23 14:30, 10:31, 22:32	84
<i>Lumbricus terrestris</i> (stor daggmask) ..	5:9, 9:14, 36:22, 3:23 10:25, 9:27, 15:28, 37:29, 67:30, 34:31, 4:32	229
<i>Lumbricus</i> sp.	5:27, 6:28, 6:30	17
<i>Allolobophora chlorotica</i> (grön daggmask)	2:3, 27:13, 18:17, 3:19 25:22, 21:25, 10:26, 60:27, 62:29, 12:30, 43:31	283
<i>Eisenia rosea</i> (rosa daggmask)	10:25, 2:28	12
<i>Eiseniella</i> sp.	3:1, 1:4	4
<i>Nais variabilis</i>	5:2, 8:5	13
<i>Herpobdella octoculata</i>	2:2, 1:5, 1:19	4
<i>Herpobdella</i> cf. <i>stagnalis</i>	1:1, 1:5, 1:17	3
<i>Haemopsis sanguisuga</i> (hästigel)	1:1	1
<i>Glossosiphonia complanata</i>	1:2	1
<i>Piscicola</i> sp.	1:1	1
<u>Crustacea (kräftdjur):</u>		
<i>Cyclops viridis</i> (hoppkräfta)	+2, 20:5, 3:12	
<i>Chydorus sphaericus</i>	15:3, 3:15, 5:19	23
<i>Argulus foliaceus</i> (karplus)	2:1	2
<i>Gammarus pulex</i> (märlkräfta)	11:1, 11:2, 10:4, 1:5, 2:12, 31:15, 4:19, 6:20, 4:22, 1:23, 7:24	88
<i>Asellus aquaticus</i> (sötvattensgråsugga).	19:10, 10:2, 15:5, 4:7 12:12, 44:15, 3:16, 16:17, 35:19, 29:20, 13:22, 4:23 39:24	243

ART	ANTAL:STATION	TOTALT
<i>Oniscus asellus</i> (gråsugga)	2:1, 5:3, 1:4, 1:7, 3:8 4:12, 3:13, 1:18	20
<i>Porcellio pictus</i>	1:1, 2:2, 1:3, 1:8, 2:9	7
<i>Porcellio marginata</i>	2:1, 1:3, 1:7, 1:8	5
<i>Trichoniscus</i> sp.	2:1, 3:4, 2:8	7
<i>Armadilidium</i> sp.	1:2, 1:7, 1:8, 2:11	5
<u>Myriapoda (tusenfotingar):</u>		
<i>Glomeris marginata</i> (klotdubbelfoting) ..	2:3, 2:12, 2:18	6
<i>Julius scandinavicus</i>	2:8	2
<i>Geophilus longicornis</i>	1:3	1
<i>Geophilus</i> sp.	1:1, 1:3, 2:7	4
<i>Lithobius forficatus</i> (brun stenkryp) ..	2:3	2
<i>Lithobius</i> sp.	1:1	1
<u>Chelicerata (spindeldjur):</u>		
<i>Neobisium</i> sp (klokryp)	2:1	2
<i>Aranea diadema</i> (korsspindel)	4:3, 2:4, 1:6, 1:7, 9:10 3:11, 7:12, 3:14, 2:25, 1:30	33
<i>Aranea quadratus</i>	4:8	4
<i>Meta menardi</i> (grottspindel)	1:6, 2:7, 1:8, 1:9, 7:10 4:11, 5:14, 2:17, 2:19, 1:26, 1:30	27
<i>Meta merianae</i>	4:3, 1:4, 5:7, 2:8, 3:14 2:19, 1:25, 2:27, 1:28, 1:29 2:31	24
<i>Meta</i> sp.	1:27, 2:29, 1:30	4
<i>Tegenaria atrica</i>	2:1, 1:3	3
<i>Tetragnatha extensa</i> (kåkspindel)	2:1, 1:2, 1:3	4
<i>Trochosa terricola</i>	1:2, 1:3, 8:7, 1:20	11
<i>Lycosa palustris</i>	2:1, 2:3, 1:8, 1:10	6
<i>Lycosa</i> sp.	1:2, 1:7	2
<i>Porhonna pygmaeum</i>	1:2, 4:3, 1:7, 1:10, 1:19 1:29	9
<i>Porhonna</i> sp.	1:3, 1:8, 1:19	3
<i>Oedothorax retusus</i>	2:1, 1:3, 1:8	4
<i>Erigone dentipalpis</i>	2:11	2
<i>Phalangium opilio</i> (stor lockespindel) ..	2:3, 1:7, 2:8, 1:10, 1:14	7
<i>Liobonom rotundum</i>	1:26	1
<u>Insecta, Collembola (hoppstjärtar):</u>		
<i>Tomocerus vulgaris</i>	3:1, 7:3, 1:11	11
<i>Isotoma</i> sp.	4:13, 1:25	5
<u>Insecta, Hemiptera (skinnbaggar):</u>		
<i>Nepa cinerea</i> (klodyvel)	1:1	1
<i>Notonecta</i> sp. (ryggsimmare)	3:32	3
<u>Insecta, Coleoptera (skalbaggar):</u>		
<i>Stenophylax permistrus</i>	2:3	2
<i>Hygromoma dimidiata</i>	1:10, 3:18, 1:25, 1:26, 2:29	7
<i>Hydroporus palustris</i> (dykarbagge)	1:2, 1:3, 1:7, 1:10	4
<i>Atheta trinotata</i>	1:2	1
<i>Onalium rivulare</i>	3:1, 2:2, 1:5, 1:6, 1:8, 1:18	9
<u>Insecta, Trichoptera (nattsländor):</u>		
<i>Apatania zonella</i>	1:2	1
<i>Apatania</i> sp.	5:1, 3:3	8

ART	ANTAL:STATION	TOTALT
<u>Insecta, Lepidoptera (fjärilar):</u>		
<i>Scoliopteryx libatrix</i>	1:2, 1:3, 5:4	7
<i>Triphosa dubitata</i> (nattfly)	16:3, 5:4, 1:5	22
<i>Triphosa</i> sp.	5:3, 2:4	7
<i>Cidaria quadrfasciata</i>	3:2, 7:3, 1:4	11
<i>Cidaria</i> sp.	1:3, 4:4	5
<u>Insecta, Diptera (tvåvingar):</u>		
<i>Culex</i> sp. (stickmygga)	150:2, 80:3	230
<i>Culex pipiens</i>	1:13, 5:14, 5:16, 10:18	21
<i>Aedes</i> sp.	130:2, 4:14, 7:16	141
<i>Anopheles</i> sp. (frossmygga)	50:4, 25:5, 16:7, 1:10	92
<i>Helomyza serrata</i>	26:3, 17:4, 2:16	45
<i>Eristalis tenax</i> (slamfluga)	8:3, 2:4	10
<i>Eristalis</i> sp.	1:3, 1:4, 5:5	7
<u>Pisces (fiskar):</u>		
<i>Gasterosteus pungitus</i> (småspigg)	2:1, 6:4, 1:5, 1:12, 5:15 2:19, 4:20, 7:22, 5:23, 10:24	43
<u>Mammalia, Rodentia (gnagare):</u>		
<i>Mus musculus</i> (husmus)	1:3	1
<u>Mammalia, Chiroptera (fladdermöss):</u>		
<i>Myotis mystacinus</i> (mustaschfladdermus)	2:3, 4:10	6
<i>Pipistrellus pipistrellus</i> (dvärgfl.)...	2:3, 4:4, 7:6, 2:10, 1:12	16

REFERERAD LITTERATUR

Förkortningar:

- A-UIS 6 = International Speleology 1973, Abstracts of paper.
Ed. V. Panos. Olomouc 1973.
- P-UIS 6 = International Speleology. Proceedings of the 6th
international congress of speleology, delarna 1-8.
Ed. V. Panos. Olomouc 1975-1978.
- P-UIS 7 = Proceedings of the 7th International Speleological
Congress, Sheffield, England, september 1977. Ed.
T. D. Ford. Sheffield 1977.
- T-CRG = The Transactions of the Cave Research Group of Great
Britain.
- T-BRCA = Transactions, British Cave Research Association.
- NSS-B = National Speleological Society Bulletine. USA.
- NSS-N = National Speleological Society News. USA.
- SGU = Sveriges Geologiska Undersökning.
- Grottan = Organ för Sveriges Speleolog-Förbund. Stockholm.
Ed. = Redaktör.

Förklaring till sifferkombinationer:

1/2:3-4. 1 = årgång, band. 2 = häfte, nummer. 3-4 = sidor.

- Abrahamsson. K. V. 1974. *Äkäslompolo-områdets glacialmorfologi
och deglaciation*. Gerum B 1. Umeå Universitet.
- Alexandersson. O. 1975. *Vattnets hälsa - och människans*. Sid.
30-55 i *Nya vägar till hälsa*. Ed. N. O. Jacobson.
Natur och Kultur. Stockholm.
- Andersson-Gusting. M. 1962. *Hydrogeologiska undersökningar av
Lummelundaströmmen*. Examensarbete Geologiska inst.
CTH. Göteborg.
- Arrhenius. O. 1938. *Den gotländska jordens fosfathalt*. SGU
ser. C:412.
- Aspegren. J. 1962. *Utlåtande, av den 12/12 1962, rörande syne-
för rättning av Martebo myr*. Opublicerat. Lantbruks-
nämnden i Visby.
- Atkinson. T. C. 1978. *Paleoclimatic and geomorphic implications
of 230 Th/234U dates on speleothems from Britain*.
Nature 272:24-28.

- Atkinson-Smith. D. I. 1976. *The erosion on Limestone*. Sid. 151-177 i *The science of speleology*. Ed. T. D. Ford-Cullingford. Academic Press. London.
- Atkinson-Smart-Harmon. 1977. *Radiometric dating of speleothems and cavern development in the Mendip hills, England*. P-UIS 7:5-9.
- Bakalowicz. M. 1977. *Géochimi des eaux karstiques et karstification*. Ann. de Spéléol. 30/4:581-589.
- Balázs. D. 1977. *The geographical distribution of karst areas*. P-UIS 7:13-15.
- Baldwin. R. 1975. *A theoretical model for cave air flows: the chimney effect*. Ms. Thesis. Dep. of Geography. Univ. of Alberta.
- Barany-Mezosi. G. 1977. *Interrelation of some factors of karst corrosion in a doline in the Bukk mountains. Hungary*. P-UIS 7:20-22.
- Barber. H. 1931. *Traps for cave inhabiting insects*. Elisha Mitchell Sci. Soc. Vol. 46:2.
- Bastin-Dupuis-Quinip. 1977. *Preliminary results of the application of quarternary geological methods of speleogenetic studies of a Belgian cave*. P-UIS 7:24-28.
- Beck. B. F. 1980. *Karst and pseudokarst: on definitions*. NSS-B 2:25.
- Behrens. S. E. 1953. *Morfometriska, morfogenetiska och tektoniska studier*. Med. från Lunds Univ. Geogr. Inst. Avhandlingar XXIV.
- Benedict. E. M. 1977. *Hot air raises, cold air sinks*. Speleograph 13/7:73-77. Oregon.
- Bernasconi. R. 1975. *Le mondmilch calcitique et ses formes cristallines*. Stalactite 25/2:8-10. Neuchatel.
- Bini-Giulio. C. 1977. *Some considerations on the applicability of speleogenetic and morphogenetical theories*. P-UIS 7:45-46.
- Birot. P. 1954. *Problèmes de morphologie karstique*. Ann. de Geogr. 63:160-192.
- Bray. L. G. 1976. *Recent chemical work in the Ogof Ffynnon Ddu system: conductivity recording at the resurgence*. T-CRG 3:15-19.
- Brook. G. A. 1977. *Preliminary thoughts on a structural-lithological model of karst landform development*. P-UIS 7:81-83b.

- Brook-Ford, D. C. 1977. *The sequential development of karst landforms in the Nahanni region of northern Canada and a remarkable size hierarchy*. P-UIS 7:77-81.
- Brucker, R. 1979. *New Kentucky junction*. NSS-N 10:231-236.
- Bukovinsky, V. 1966. *Contribution to the problems of the origin of currents of air in caves*. Problems of the spel. research II:247-253. Brno.
- Bull, P. A. 1976. *Cave sediment studies in South Wales*. Ph. D. Thesis. Univ. of Wales. Swansea.
- 1977a. *Boulder chokes and doline relationships*. P-UIS 7:93-96.
- 1977b. *Laminations or varves? Processes and mechanism of finegrained sediment deposition in caves*. P-UIS 7:86-89.
- Bögli, A. 1960. *Kalklösung und Karrenbildung*. Z. Geomorph. Suppl. 2:4-21.
- 1964. *Mischungskorrosion: ein Beitrag zum Verkarstungsproblem*. Erdkunde 18/2:83-92.
- 1971. *Corrosion by mixing of karst waters*. T-CRG 13/2:109-114.
- 1978. *Karsthydrographie und physische Speläologie*. Springer Verlag. Berlin - New York.
- Caumartin, V. R. 1958. *La corrosion biochimique dans un réseau karstique et la genèse du Mondmilch*. Notes Biospel. 13:87-109.
- Chabot, C. 1943. *La naissance d'un karst: l'île de Gotland*. Ann. de Geogr. 289:98-104.
- Chauvin, R. 1963. *Le peuple des Insects*. Paris.
- Cigna, A. 1976. *The spelomagnetic role of the laminar flow diffusion effect*. P-UIS 6/3:33-37.
- Collcutt, S. N. 1977. *Methodology in the analyses of quaternary cave sediments*. P-UIS 7:121-122.
- 1979. *The analyses of quaternary cave sediments*. World Archeology 10/3:290-301.
- Corbel, J. 1952. *Les phénomènes karstiques en Suède*. Geogr. Ann. 34:203-237.
- 1957. *Les karst du Nord-Ouest de l'Europe*. Mem. Institut Etudes Rhodaniennes. Lyon.
- Cox-Harvey, M. 1977. *Photosynthesis in the deep twilight zone*. P-UIS 7:131-133.

- Csekö. A. K. 1973. *Natural noise levels in caves*. A-UIS 6:185.
- Cser-Mauchá. F. 1968. *Contribution on the origin of "exentric" concretions*. Karszt-és Barlangkutató 83-98. Ungern.
- Curl. R. L. 1964. *On the definition of a cave*. NSS-B 26/1:1-6.
- Cvijič. J. 1893. *Das Karstphänomen*. Geogr. Abh. 5:217-329.
- Davies. W. M. 1930. *Origin of limestone caverns*. Geol. Soc. America Bull. 41/3:475-678.
- Davies. W. E.-Morgan. I. M. 1977. *Geology of Caves*. US Geological Survey. Wasington.
- Day. M. 1976. *The morphology and hydrology of some Jamaican karst depressions*. Earth Surface Processes 1/2:111-130.
- Dreiss. S. 1974. *Lithological controls on solution of carbonate rocks in Christian County, Missouri*. Proc. of 4th conf. on karst geol. and hydrol. 145-152. Morgantown.
- Drew. D. P. 1968. *A review of available methods for tracing underground waters*. Proc. British Spel. Ass. 6:1-19.
- Droppa. A. 1966. *The correlation of some horizontal caves with river terraces*. Studies in Spel. 1/3:186-192.
- Dublajanski-Sokova. L. M. 1977. *Microclimate of karst cavities of the mountain Crimea*. P-UIS 7:158-160.
- Ekström. G. 1934. *Geologi och slagruta*. Särtryck efter artikel i Nya Daglig Allehanda 24/2 1934.
- Elliot. J. 1977. *Some methods for the statistical analysis of samples of bethnic invertebrates*. Freshwater Biol. Ass. Sci. Publ. No 25.
- Ellis. B. 1976. *Surveying caves*. BCRA. Somerset.
- Engh. L. 1978. *Karstområdet med Lummelundagrottan vid Lumme-lunds bruk*. Geovetenskaplig inventering. Länsstyrelsen I-län.
- 1980. *Skandinavisk speleokronologi i ny belysning genom nyupptäckta grottor i Vadvevagge*. Grottan 15/1:3-22.
- 1980b. *Can we determine solutional erosion by a simple formula?* T-BCRA 7/1:30-32.
- Eraso. A. R. 1976. *New methods in karst investigation*. P-UIS 6/2:103-108.
- Ewers. R. O. 1974. *The pattern of speleogenesis in the Mid-western USA karst*. Proc. 4th conf. on karst geol. and hydrol. 139-143. Morgantown.
- Fabre. G. 1978. *Speleological conventional signs*. UIS. Nimes.
- Fegaeus. L. 1888. *Om Gotlands myrar*. Svenska mosskulturför-eningens tidskrift.

- Fodor. I. 1975. *Influence of tourism on the microclimate of caves*. Proc. of the Intern. Conf Baradla. 150:189-199.
- Ford. D. C. 1971. *Geologic structure and a new explanation of limestone cavern genesis*. T-CRG 13/2:81-94.
- 1977a. *Karst and glaciation in Canada*. P-UIS 7:188-189.
- 1977b. *Genetic classification of solutional cave system*. P-UIS 7:189-192.
- Ford. D. C.-Ewers. R. O. 1978. *The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth*. Canadian Journal of Earth Sci. 15/11:1783-1798.
- Ford. T. D.-Cullingford. 1976. *The science of speleology*. Constable Ltd. Edinburgh.
- Franke. H. W. 1963. *Formprincipien des Tropfsteins*. Proc. 3rd Int. Congr. Spel. 2:63. Wien.
- 1975. *Corresponding between sintering and corrosion*. Ann. de Spéléol. 30/4:665-672.
- Franke-Geyh. M. A. 1971. *Radiokohlenstoff analysen an Tropfsteinen*. Umschau in Wissenschaft und Technik 71/3:91.
- Freij. Y. 1968. *Jämtland - ett säreget grottlandskap*. Grottan 2/3-4:12-21.
- Reinhard-Frohlich-Smith. 1977. *Geophysical investigations over karst water in southeastern Missouri*. Sid. 96-106 i *Hydrologic problems in karst regions*. Ed. Dilamarter-Csallany. Western Kentucky Univ.
- Gascoyne. M. 1977. *Trace element geochemistry of speleothems*. P-UIS 7:205-208.
- Gemiti-Merlak. E. 1976. *The influence of the surface ground on the chemical characteristic of the percolation water in karst soils*. Sid. 61-91 i *Karst processes and relevant landforms*. Ed. I. Gams. Ljubljana.
- Gislén-Brinck. P. 1948. *Subterrana vatten på Gotland med speciell hänsyn till Lummelundaströmmen. I. Historik och morfologi*. Lunds Universitets Årsskrift Avd. 2 Bd 44/4.
- 1950. *Subterranean waters on Gotland with special regard to the Lummelunda current. II. Environmental conditions, plant and animal life, immigration problems*. Lunds Universitets Årsskrift Av. 2 Bd 46/6.
- Gorbunova. K. A. 1968. *Morphometric character of a carbonate karst (Russian)*. Karst Urala i Priural'ya 33-39.
- Gospodaric. R. *The collapse of speleothems in the Postojna cave system*. P-UIS 7:223-225.

- Gotlands Turistförening 1960-1979. Årsberättelser. Visby.
- Gregor-Prince. H. 1975. *Die Radiotest-methode und ihre anwendung in der geologischen erforschung in karstgebieten.* Ann. de Spéléol. 30/4:681-690.
- Grund. A. 1903. *Die Karsthydrographie.* Geogr. Abh. 7/3.
- The Guinness Book of Records. 1978. London.
- Guyer-Hutson. R. 1955. *A comparison of sampling techniques utilised in an ecol. of aquatic insects.* Journ. Ecol. Ent. 48.
- Gvozdetsky. N. A. 1973. *On the priority of the discovery of the phenomena of mixed solution.* A-UIS 6:116.
- Habe. F. 1974. *Inventory of commercial (or show) caves of the world.* Stencil. Commision of tourist caves. UIS. Wien.
- Harmon. R. S. 1974. *Late Pleistocene glacial chronology as inferred from speleothem age determination.* Proc. 4th conf. on karst geol. and hydrol. 165-167. Morgantown.
- 1975. *Late Pleistocene paleotemperatures in North America as inferred from isotopic variations in speleothems.* Ph. D. Thesis. McMaster Univ. Ontario.
- Harmon-Thompson-Schwacz-Ford. 1975. *Uranium series dating of speleothems.* NSS-B 37/2:21-32.
- Harmon-Russel. S. 1975. *Late Pleistocene paleoclimates of North America as inferred from stable isotope studies of speleothems.* Quaternary Research 9/1:54-60.
- Helldén. U. 1974. *Karst. En studie av Artfjällets karstområde med jämförande korrosionsanalyser från Västspetsbergen och Tjeckoslovakien.* Med. från Lunds Univ. Geogr. Inst. ser. Avhandlingar LXXII.
- Hellgren. L-G. 1969. *Geologisk och hydrogeologisk undersökning av ett karstområde vid fjället Lullihatjärro norr om Torne Träsk, Lappland.* Examensarbete. Geologiska inst. CTH. Göteborg.
- Hill. C. A. 1976. *Cave minerals.* The Speleo Press. Austin.
- Hinricsson. H. 1955. *Om halten av bakterier och vattnets karaktär i den nyupptäckta delen av Lummelundagrottan.* Geol. För. Förh. 77/4:289.
- Howard. A. D. 1964. *Processes of limestone cave development.* Int. Journ. of Speleol. 1/1-2:47-60.
- Hutchinson. G. E. 1957. *A treatise on limnology.* Wiley. London.
- Jackson-Taylor. L. 1950. *The comparison on suction trap, sticky trap and townet for the quantitative sampling of small airborne insects.* Ann. Apl. Biol. 37.

- Jacobson-Langmuir. D. 1972. *An. accurate method for calculating saturation levels on ground waters with respect to calcite and dolomite.* T-CRG 14/2:104-108.
- Jakucs. L. 1977. *The morphogenetics of karst regions.* Akadémia i Kiadó. Budapest.
- Jakucs-Mezosi. G. 1977. *Genetic problems of the huge gypsum caves of the Ukraina.* P-UIS 7:248-251.
- Jamier-Mathey. B. 1977. *Fissuration et orientation des depressions karstique.* Bull. Soc. Neuchât. Sci. Nat. 100:149-156.
- Janson-Zucchetto. J. 1978. *Energy, Economic and Ecological relationships for Gotland, Sweden.* Ecological Bulletins 28. Stockholm.
- Jasinski. H. 1978. *Korrosionsberäkningar från två karstområden, Mieseken i Tärnafjällen och Lummelunda på Gotland. Seminarieuppsats.* Naturgeogr. Inst. Lunds Universitet.
- Jennings. J. N. 1971. *Karst.* The M. I. T. Press. Vol 7. Cambridge och London.
- Jeno. B. 1977. *Das Höhlenbad in Miskolc-Tapolca steht im dienst der therapie des Menshen.* P-UIS 7:22-23.
- Joyce. J. W. 1931. *Electromagnetic absorption by rocks with some experimental observations taken of the Mammoth Cave of Kentucky.* U. S. Bureau of Mines techn. paper 497:28.
- Kastning. E. H. 1977. *Karst landforms and speleogenesis in prekambrian granite, Llano county, Texas.* P-UIS 7:253-255.
- Kempe. S. 1975. *Ca and Mg organic komplexes in the water.* Ann. de Spéléol. 30/4:695-698.
- 1976. *Höhlenbildung und Wasserkörper in stillwasserbereich.* P-UIS 6/4:125-132.
- Kempe-Brandt-Seeger-Vladi. 1975. *Facetten and Laugdecken, the typical morphological elements of caves developing in standing water.* Ann. de Spéléol. 30/4:707-708.
- Kempe-Spaeth. C. 1977. *Eccentrics: Their capillaries and grow rates.* P-UIS 7:259-262.
- Kiknadze. T. Z. 1973. *Concerning the correlation of karst caves with terraces.* A-UIS 6:78.
- Kirk. K. G. 1975. *Resistivity and gravity surveys applied to karst research.* Proc. of Virginia Univ. Karst Symposium 1974.
- 1978. *Update: investigation of seismic techniques in locating caves.* Geo² 5/2-3:4. NSS. USA.

- Knutsson. G. 1971. *Studies of ground-water flow in various aquifers using tracers*. Stencil. Svenska vägforskningsinstitutet. Stockholm.
- 1974. *Tracing water flow in organic soils and in some karst areas of Sweden*. Nordisk hydrol. konferens 488-507. Köpenhamn.
- Kooper-Young. C. 1976. *The relationship between prehistoric man and karst*. NSS-B 38/2:17-26.
- Král. Z. 1975a. *Die bedingungen der Färbigkeit von Tropfsteinformationen*. P-UIS 6/1:269-271.
- 1975b. *Der einfluss des hydrostatischen druckes auf die lösung von kalkstein und auf den entstand der Tropfsteinformationen*. P-UIS 6/1:259-268.
- Krulc. Z. 1975. *Einige gesichtspunkte der anwendung von geophysikalischen methoden in der Speläologie und karsthydrologie*. P-UIS 6/1:279-289.
- Kurtén. B. 1969. *Istiden*. Forum. Stockholm.
- Köppen. W. 1936. *Das geographische System der Klimate*. Sid 1-44 i *Handbuch der Klimatologie*. Bd. 1, del C. Berlin.
- Larsson-Åström. L-E. 1979. *Visst finns det kalkstensgrottor i Mellansverige*. Grottan 14/3:23-26.
- Laufeld. S. 1974. *Reference localities for palaeontology and geology in the Silurian of Gotland*. SGU. C. 705.
- LaValle. P. 1968. *Karst mophology in south central Kentucky*. Geogr. Ann. 50. A:94-108.
- Lavery-Crabtrees. 1978. *Ranciéte and mirabelite: some preliminary results on cave mineralogy*. T-BCRA 5/3:135-142.
- Lehman. H. 1936. *Morphologische studien auf Java*. Geogr. Abh. III/9.
- Lenander. B. 1978. *Med radiopejl i Lummelundaterrängen*. Grottan 13/1:34-35.
- Lid. J. 1974. *Norsk og svensk flora*. Oslo.
- Lindén. A. H. 1975. *Slingramsjakt efter Lummelundagrottan*. Grottan 10/3:28-31.
- Lindén-Odell. B. 1978. *Översikt över Lummelundagrottornas geologi*. Grottan 13/1:19-25.
- Lindh. G. 1972. *Vertikalprocesser vid jordytan*. Sid. 141-192 i *Hydrologi*. Lind-Falkenmark. Studentlitteratur. Lund.
- Lindström. T. 1886. *Postglaciala sänkningar av Gotland*. Geol. För. Förhandl. Bd. 8:251-281.

- Linné. C. 1975. *Öländska och Gothländska resa 1741*. Faksimil-utgåva. Wahlström & Widstrand. Stockholm.
- Liszkowsky. J. 1976. *Ist die Mischungskorrosion die einzige im preatistischen Bereich der Karstgrundwasserleiter wirksame Korrosionsform?* P-UIS 6/3:193-198.
- Lundberg. E. B. 1939. *Lummelunds bruk*. Jernkontorets bergshistoriska skriftserie no 8.
- Lundvall. C-F. 1964. *Karstmorfologiska undersökningar i Lummelundaområdet*. Seminarieuppsats. Naturgeogr. Inst. Uppsala Universitet.
- 1965. *Karst phenomena in the Lummelunda area of Gotland*. Geogr. Ann. 47 A:45-60.
- Lundqvist. G. 1961. *Beskrivning till karta över landisens avsmältning och högsta kustlinjen i Sverige*. SGU. Ba 18.
- Lundqvist-Hede-Sundius. 1940. *Beskrivning till kartbladet Lummelunda*. SGU. Aa 183.
- Lysenko. V. 1975. *Change in cave regime as a consequence of general public accessibility*. Ann. de Spéléol. 30/4: 719-724.
- Magnusson-Lundqvist-Regnell. 1963. *Sveriges geologi*. Stockholm.
- Maleev-Philipov. A. P. 1975. *Dislocation growth mechanism of calcite filamentary crystals forming "Moon Milk" from the Vodopada cave, Bulgaria*. A-UIS 6:25-26.
- Manley-Garton. E. R. 1977. *The A, B, C's of finding and delineating caves with apparent resistivity measurements*. Sid. 92-95 i *Hydrologic problems in karst regions*. Ed. Dilamarter-Csallany. Western Kentucky Univ.
- Mansfield. R. *Current titles in Speleology 1978, International*. Bath. Sommerset.
- Manten. A. 1971. *Silurian reefs of Gotland*. Dev. in Sedimentology 13.
- Marcussen. I. 1973. *Stones in danish tills as a stratigraphical tool - a review*. Bull. Geol. Inst. Uppsala.
- Maximovich. G. A. 1973. *The limestone pools and genesis of calcite dams in caves*. A-UIS 6:26.
- 1977. *Mans utilization of caves throughout the ages*. P-UIS :310-311.
- May. B. 1963. *New Zealand cave fauna. II. The limestone cave between Port Waikato and Piopio Districts*. Trans. Royal Soc. N. Z. Zool. 3/19.

- Mezősi-Bárány-Tóth. 1978. *Karstmorphometrische untersuchungen im gebirge Aggtelek (Nordungarn)*. Acta Geographica 18:131-140. Szeged.
- Moore. G. W. 1952. *Speleothems - a new cave term*. NSS-N 10/6:2.
- 1954a. *Aragonite speleothems as indicators of paleo-temperatures*. Journ. of Geology 62. Chicago.
- 1954b. *The origin of Helictites*. NSS Occ. paper 1. Huntsville.
- 1979. *New Mineral*. NSS-N 37/3:70.
- Moore-Nicholas. G. 1964. *Speleology*. Heath o Co. Boston.
- Moore-Sullivan. G. 1978. *Speleology, the study of caves*. Zephyrus Press. Teaneck.
- Munthe. H. 1920. *Strandgrottor och andra närstående geologiska fenomen i Sverige*. Kungl. Jordbruksdepartementet skrifter. XXXXVIII.
- Munthe-Hede-Post. 1925. *Gotlands Geologi*. SGU. C 331.
- Müllner-Eriksson. L. 1979. *VLF-mätningar för prospektering efter grundvatten i berg*. STU-rapport 78/3694.
- Murray. J. G. 1954. *The deposition of calcite and aragonite in caves*. Journ. of Geology 62:481-492. Chicago.
- Myers. J. O. 1975. *Cave location by electrical resistivity measurements*. T-BCRA 2/4:167-172.
- Nagy. G. 1977. *Photogrammetric method of surveying cross section of caves*. P-UIS 6/8:75-78.
- Nilsson. B. 1972. *Från St. Karlsös forntid*. Sid. 33-52 i *Stora Karlsö*. Visby.
- Nilsson. B. 1972. *Sedimenttransport i svenska vattendrag, ett IHD-projekt*. Del II. Rapport 16 Naturgeogr. Inst. Uppsala Universitet.
- Nilsson. L. 1968. *Karstfenomen på Ölands stora Alvar*. Lic. avh. opublic. Naturgeografiska inst. Lunds Universitet.
- Odell. B. 1978. *Preliminär undersökning av Lummelundagrottans fauna, del 1*. Grottan 13/1:6-18.
- 1979. *Preliminär undersökning av Lummelundagrottans fauna, del 2*. Grottan 14/1:11-21.
- Ogden-Reger. J. 1977. *Morphometric analysis of dolines for predicting ground subsidence, Monroe County, West Wirginia*. Sid. 439-449 i *Hydrologic problems in karst regions*. Ed. Dilamarter-Csallany. Western Kentucky Univ.

- Olsson-Lundevall. C-F. 1966. *A newley discovered cave system at Lummelunda, Gotland. Geogr. Ann. 48 A/1:51-54.*
- Omnes. G. 1977. *High accuracy gravity applied to the detection of karstic cavities. Sid. 273-284 i Karst hydrogeology. Ed. Tolson-Doyle. Univ. of Alabama.*
- Pálffy-Veres-Horvath-Takács-Pálffy. 1973. *Study on the evolution of chronic obstructive pneumopathy cases after underground cure in the salt mines of Praid, Roumania. A-UIS 6:189-190.*
- Palmer. A. N. 1975. *The origin of maze caves. NSS-B 37/3:56-76.*
- Pasini. G. 1975. *Sull'importanza dell'erosione antigrazoneale. Grotte de Italia 4:297-308. Bologna.*
- Persson. P. O. 1960. *Morfologiska förändringar på Ivö i samband med katastrofregnet den 31 juli 1959. Geol. För. Förh. 82/2:305-306.*
- 1963. *En nyupptäckt grottlabyrint i västra Blekinge. Geol. För. Förh. 85/2:266-275.*
- Peterson. G. M. 1976. *Pollen analysis and the origin of cave sediments in central Kentucky karst. NSS-B 38/3:53-58.*
- Picknett. R. G. 1972. *The pH of calcite solutions with and without magnesiumcarbonate present and the implications concerning rejuvenated aggressiveness. T-CRG 14/2:141-150.*
- Picknett-Stenner. R. D. 1978. *Enhanced calcite solubility in dilute magnesium carbonate solutions. T-BCRA 5/1:47-54.*
- Pitty. A. F. 1966. *An approach to the study of karst waters. Univ. of Hull Occasional paper. Geography 5.*
- Pobeguín. T. 1957. *Reproduction expérimentale de concrétions de carbonate de calcium. Ann. de Spéléol. 7:1-14.*
- Presti-Pettigrew. J. D. 1980. *Ferromagnetic coupling to muscle receptors as a basis for geomagnetic field sensitivity in animals. Nature 285:99-101.*
- Pribyl. J. 1973. *Paleohydrography of the caves in the Moravsky Kras. Studia Geographica 28:5-54. Brno.*
- Priestley. J. B. 1964. *Man and time. Aldus Books. London.*
- Pringle. J. M. 1973. *Morphometric analysis of surface depressions in the Mangapu karst. M. A. Thesis. Univ. of Auckland.*
- Pulina. M. 1960. *Uwagi o mikroklimacie Jaskini Snieznej. Speleologia 8/2:2-4. Warszawa.*

- Quitt. E. 1965. *The main climatic conditions in the Moravian karst*. Probl. of Speleol. Research 1. Brno.
- Rainer. S. 1977. *Das Lichtschnittgerät - ein Instrument zur schnellen und genauen Aufnahme von Profilen in unterirdischen Hohlräumen*. P-UIS 6/8:103-106.
- Rasmusson. G. 1957. *Formproblem i några karstgrottor inom Torneträskområdet*. Lic. avh. opublic. Naturgeogr. Inst. Lunds Universitet.
- Rauch. H. 1974. *The effects of silty streaks and bedding partings on cave development in central Pensylvania*. Proc. 4th conf. on karst geol. and hydrol. 153-159. Morgantown.
- Raulet. M. 1975. *Réalisation d'un appareil de géophysique servant au positionnement en surface d'une galerie souterrain accessible*. Ann. de Spéléol, 30/3:409-415.
- Rechtien-Gardner-Sanders-Tucker. 1975. *The detection and mapping of subterranean water bearing channels. Phase 2. Final report*. Dep. of Geophysics. Missouri Univ. Rolla.
- Regnell-Hede. E. 1960. *The silurian of Gotland*. Intern. Geol. Congr. in Norden 1960. Stockholm.
- Renault. P. 1960. *Rôle d'érosion et de la corrosion dans le creusement d'un réseau karstique*. Rev. Geomorph. Dynam. 1:1-3.
- Rocard. Y. 1964. *Biological effects of magnetic fields*. Sid. 279-286. Ed. Branothy. M. F. Plenum. New York.
- Roda. S. 1973. *Problems of the definition of the term of static caves*. A-UIS 6:190.
- Roda-Rajman. L. 1976. *Beitrag zur Forschung über die genesis von plastischen sinter in einigen Höhlen der CSSR*. P-UIS 6/3:261-266.
- Rousset. A. 1967. *Quelques aspects du climat de la grotte d'Antheuil*. Ann. de Spéléol. 22/2:269-296.
- Rudberg. S. 1967. *The cliff coast of Gotland and the rate of cliff retreat*. Geogr. Ann. 49 A:283-289.
- Rudyard. F. 1972. *Metoder för malmletning*. Almqvist & Wiksell. Uppsala.
- Russel. R. J. 1949. *Geographical geomorphology*. Ann. of the Ass. of Amer. Geogr. 39:1.
- Russel. H. G. 1972. *Air conditioning surface buildings with cave air*. P-UIS 7:232-234.

- Ryder. P. F. 1975. *Phreatic network caves in the Swaledale area. Yorkshire.* T-BCRA 2/4:177-192.
- Schulz. E. 1952. *Kluterhöhle und Astma.* Medicin. Klinik 40:1310-1311. Nürnberg.
- Schwoerber. J. 1970. *Methods of hydrobiology.* Freshwater Biol. Ass. 11.
- Schytt. V. 1974. *Inland ice sheets - recent and Pleistocene.* Geol. För. Förh. 96:299-309.
- Sepp-Luther. U. 1961. *Karstfenomen på Gotland.* Seminarieuppsats. Naturgeogr. Inst. Göteborgs Univsitet.
- Sernander. R. 1941. *Gotlands kvarlevande myrar och träsk.* Kungl. Svenska Vetenskapsak. avh. i naturskyddsärenden. No 3.
- Shaw. T. D. 1979. *History of cave science: the scientific investigation of limestone caves to 1900.* Oldhams books. Crymych.
- Shuster-White. W. B. 1971. *Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs.* Journ. of Hydrology 14:93-128.
- Sjöberg. R. 1975. *Knut Lindberg.* Grottan 10/3:3-6.
- 1978. *Morfografiska och morfogenetiska studier av ett antal grottor i Lidberget, Nordmaling.* Seminarieuppsats. Naturgeogr. Inst. Umeå Universitet.
- 1979. *Morfografiska och morfogenetiska studier av några urbergsgrottor i södra Västerbotten.* Seminarieuppsats. Naturgeogr. Inst. Umeå Universitet.
- 1980. *Grottområdet vid Övre Ältsvattnet.* Svenska Grottor 2. Sveriges Speleolog-Förbund.
- Smith. D. I. 1965. *Some aspects of limestone solution in the Bristol region.* Geogr. Journ. 131:44-49.
- Smith. D. I.-Atkinson. T. D. 1976. *Process, landforms and climate in limestone regions.*
- *Geomorphology and climate.* Sid. 367-409. Ed. E. Derbyshire. Wiley & Sons. London.
- Smith. D. I.-Mead. D. G. 1962. *The solution of limestone.* Proc. Univ. Bristol. Speleol. Soc. 9:188-211.
- Solecki. R. S. 1979. *Contemporary Kurdish wintertime inhabitants of Shanidar cave, Iraq.* World Archeology 10/3:318-330.
- Spalding-Mathews. T. D. 1972. *Stalagmites from caves in the Bahamas: Indicator of low sea level stand.* Quaternary Research 2:470-472.

- Stenner. R. D. 1977. *The natural removal of some heavy metals from streams by limestone*. P-UIS 7:384-387.
- Stephansson. O. 1979. *Magi eller vetenskap. Renässans för slag-rutan?* Dagens Nyheter 28:e dec. sid 4.
- Stone, R. W. 1953. *Descriptions of Pennysylvania's undeveloped caves*. NSS-B 15:63-73.
- Straus. G. 1979. *Caves: a paleoanthropological resource*. World Archeology 10/3:331-339.
- Stringfield-Rapp. J. R. 1977. *Progress of knowledge about the hydrology of carbonate terranes*.
 ——— *Hydrologic problems in karst regions*. Sid. 1-9. Ed. Dilamater- Csallany. Western Kentucky Univ.
- Svantesson. S. I. 1976. *Granulometric and petrographic studies of till in the Cambro-Silurian area of Gotland, Sweden, and studies of the ice recession in northern Gotland*. Striae 2. Uppsala.
- Sweeting. M. M. 1972. *Karst Landforms*. Macmillian. London.
 ——— 1975. *Some comments on the lithological basis of karst landform variations*. P-UIS 6/1:319-329.
 ——— 1976. *Present problems in the karst denudation research in the world*. Sid. 7-15 i *Karst processes and relevant landforms*. Ed. I. Gams. Ljubljana.
 ——— 1976b. *Present problems in karst geomorphology*. Z. für Geomorph. Suppl. 26:1-5.
 ——— 1978. *The landscape of one-seventh of China*. Geographical Magasin 50/6:393-400.
- Svenonius. F. 1880. *En egendomlig dalgång i nordligaste Jemtland*. Geol. För. Förh. 5:76-82.
- Swinnerton. A. C. 1932. *Origin of limestone caverns*. Geol. Soc. America Bull. 79:19-46.
- Sylvan. C. A. 1892. *Gotlands naturbeskaffenhet, jordbruksförhållanden, dess myrars utsträckning samt äldre och nyare försök till deras odlande*. Svenska mosskultur-föreningens tidskrift 1892.
- Talbour. B. 1975. *Inventaire spéléologique du massif de la Chartreuse*. CDS Isère. Grenoble.
- Tell. L. 1955. *Underjordens vackra värld*. Fritzes. Stockholm.
 ——— 1960. *Lummelundagrottorna*. Centrocommerce. Norrköping.
 ——— 1961a. *Erosionsförloppet med särskild hänsyn till Lummelundagrottorna*. Arkiv för sv. grottforsk. No 1. Norrköping.

- Tell. L. 1961b. *Grottorna i Lummelunda en orientering*. Geol. För. Förh. 83/1:86-89.
- 1963. *Preliminär katalog över grottor i Sverige*. Arkiv för sv. grottforskn. No 3. Norrköping.
- 1964. *Speleologiska studier i svensk natur*. Arkiv för sv. grottforskn. No 4. Norrköping.
- 1966. *Supplement nr 1 till Grottor i Sverige*. Arkiv för sv. grottforskn. No 6. Norrköping.
- 1967. *Den medicinska vetenskapen går under jorden*. Grottan 2/2:1-8.
- 1969. *Urbergsgrottor*. Arkiv för sv. grottforskn. No 9. Norrköping.
- 1970. *Supplement nr 2 till Grottor i Sverige*. Arkiv för sv. grottforskn. No 10. Norrköping.
- 1974. *Supplement nr 3 till Grottor i Sverige*. Arkiv för sv. grottforskn. No. 13. Norrköping.
- 1976. *About karst in general and Swedish karst in particular*. P-UIS 6/2:381-407.
- Tell-Freij-Johansson. 1967. *Balsbergsgrottan*. Arkiv för sv. grottforskn. No 7. Norrköping.
- Thompson-Schwarcz-Ford. 1974. *Stable isotope geochemistry, geothermometry and geochronology of speleothems from West Wirginia*. Bull. Geol. Soc. America. 87:1730-1738.
- Trevor. G. P. 1977. *The activity of Lumbriciade in a northern English cave*. P-UIS 7:353-355.
- Trimmel. H. 1968. *Höhlenkunde*. Vierweg. Braunschweig.
- Trombe. F. 1952. *Traité de spéléologie*. Payot. Paris.
- Trudgill. S. T. 1976. *Rock weathering and climate: quantitative and experimental aspects*. Sid. 59-100 i *Geomorphology and climate*. Ed. E. Derbyshire. Wiley & Sons. London.
- Wahlin. B. J. O. 1942. *Om de gotländska myrdikningarna*. Svenska vall och mosskulturföreningens tidskrift 1942.
- Waltham. A. C. 1977. *White Scar cave*. T-BCRA 4/3:345-354.
- Warwick. G. T. 1976. *Geomorphology and caves*. Sid. 61-125 i *The science of speleology*. Ed. Ford-Cullingford. Academic Press. London-New York.
- Watson. L. 1976. *Supernature*. 4:e uppl. London.
- Werner. E. 1976. *Stratigraphic and structural control of cavern development in Pocahuntas county, West Wirginia, USA*. P-UIS 6/3:309-316.

- White. W. B. 1976. *Geology and biology of Pennsylvania caves*. General Geol. Rep. 66. Harrisburg.
- 1976b. *Cave minerals and speleothems*. Sid. 267-328 i *Science of speleology*. Ed. Ford-Cullingford. Academic Press. London-New York.
- White-Longyear. J. 1962. *Some limitations on speleogenetic speculations imposed by the hydraulics of groundwater flow in limestone*. NSS-B 20/8:2.
- WIAK. 1969. *Gotlands vattenförsörjning*. Statens Naturvårdsverk. Stockholm.
- Wigley. T. M. L. 1976. *Speleogenesis: a fundamental approach*. P-UIS 6/3:317-324.
- Williams. J. E. 1949. *Chemical weathering at low temperatures*. Geogr. Rev. 39:129-135.
- Williams. P. W. 1963. *An initial estimate of the speed of limestone solution in Country Clare, Ireland*. Irish Geogr. 4:432-441.
- 1969. *The geomorphic effects of ground water*. Sid. 269-284 i *Water, earth and man*. Ed. R. Chorley. Methuen &. London.
- 1971. *Illustrating morphometric analyses of karst with examples from New Guinea*. Z. für Geomorph. 15:40-61.
- 1972a. *Morphometric analyses of polygonal karst in New Guinea*. Bull. Geol. Soc. America 83:761-796.
- 1972b. *The analyses of spatial characteristics of karst terrains*. Sid. 135-163 i *Spatial analyses in geomorphology*. Ed. R. Chorley. Methuen &. London.
- Williamson. T. 1979. *Dowsing achieves new credence*. New Scientist 81:371-373.
- Vytras-Vytrasova. J. 1976. *Determination of iron content in limestone in cave fillings with respect to their colouring (summary)*. Československý Kras 27:21-28.
- Ångström. A. 1974. *Sveriges klimat*. Kartografiska Institutet. Stockholm.
- Åkerman. J. 1972. *Speleoklimatologiska undersökningar i några sydsvenska grottor*. Rapp. och Notiser 10. Naturgeogr. Inst. Lunds Universitet.
- 1978. *IR remote sensing techniques in speleohydrological investigations*. Intern. Sympos. on Karsthydraul. 1:278-288. Budapest.

- Åström. L-E. 1975. *TV-undersökning av en brunn. Grottan 10/2: 27-39.*
- 1976. *Ryggradslöst i Lummelunda. Grottan 11/3:20-21.*
- 1978. *Fotografering av grottoprofiler - exaktare och lättare än handritning. Grottan 13/1:30-33.*

- XXVIII. *Sven Godlund*: Busstrafikens framväxt och funktion i de urbana influensfälten. (1954).
- XXIX. *Folke Lågnert*: Syd- och mellansvenska växtföljder. Del I. De äldre brukningssystemens upplösning under 1800-talet. (1955).
- XXX. *Olof Ångeby*: Toppkonstens, erosionsytor och passdalar i Jämtland och Trondelag. (1955).
- XXXI. *Gunnar Johnsson*: Glacialmorfologiska studier i södra Sverige. (1956).
- XXXII. *Folke Lågnert*: Syd- och mellansvenska växtföljder. Del II. 1900-talet. (1956).
- XXXIII. *Olof Nordström*: Befolkningsutveckling och arbetskraftsproblem i östra Småland 1800—1955. (1957).
- XXXIV. *Sven Godlund*: Befolkning — regionsjukhus — resmöjligheter — regioner. (1958).
- XXXV. *Elis Pålsson*: Gymnasiers rekrytering och lokalisering. (1958).
- XXXVI. *Harald Svensson*: Glaciation och morfologi. En glacialgeografisk studie i ett tvärsnitt genom Skanderna mellan södra Helgelandskusten och Kultsjödalén. (1959).
- XXXVII. *Erik Ljungner*: Nahuel Huapi. Ein geographischer Querschnitt durch die Anden in Patagonien. (1959).
- XXXVIII. *Nils Lewan*: Om pendling mellan bostad och arbetsplats. En undersökning med material från sydvästra Skåne. (1960).
- XXXIX. *Åke Mattsson*: Morphologische Studien in Südschweden und auf Bornholm über die nichtglaziale Formenwelt der Felsenskulptur. (1962).
- XL. *Stig Nordbeck*: Framställning av kartor med hjälp av siffermaskiner. (1964).
- XLI. *Olof Nordström*: Svensk glasindustri 1550—1960. (1962).
- XLII. *Jan Davidsson*: Littoral Processes and Morphology on Scandian Flatcoasts. (1963).
- XLIII. *Martin Markgren*: Detaljmorfologiska studier i fast berg och blockmaterial. Geomorfologisk studie inom Fennoskandia med Skåne. (1962—1963).
- XLIV. *Martin Markgren*: Geomorphological Studies in Fennoscandia. II. Chute Slopes in Northern Fennoscandia. A. Regional Studies. (1964).
- XLV. *Martin Markgren*: Geomorphological Studies in Fennoscandia. II. Chute Slopes in Northern Fennoscandia. B. Systematic Studies. (1964).
- XLVI. *Lennart Améen*: Stadsbebyggelse och domänstruktur. (1964).
- XLVII. *Arvid Bergdahl*: Det glaciala landskapet. (1961).
- XLVIII. *Olof Nordström—Solveig Mårtensson*: Turism på Öland. (1966).
- XLIX. *Jan O. Mattsson*: The Temperature Climate of Potato Crops. (1966).
- L. *Nils Lewan*: Landsbebyggelse i förvandling. (1967).
- LI. *Gösta Nordholm*: Skånes äldre ekonomiska geografi. (1967).
- LII. *Sven Godlund—Torsten Hägerstrand—Bengt Svanström*: Samhällsutvecklingen och samhällsplaneringen. (1967).
- LIII. *Tor Fr. Rasmussen*: Storbymutveckling og arbeidsreiser. (1966).
- LIV. *Erik Fagerlund—Harald Svensson—Sven Lindqvist m.fl.*: Infrarödtermografi. Principer och naturgeografiska tillämpningar. (1967).
- LV. *Lars Eldblom*: Structure foncière, organisation et structure sociale. (1968).
- LVI. *Knut Norborg*: Jordbruksbefolkningen i Sverige. (1968).
- LVII. *Gunhild Weimarck*: Ulfshult. (1968). Out of print.
- LVIII. *Rune Järvenstedt—Sven Lindqvist—Jan O Mattsson m.fl.*: Televisionsystem i naturgeografisk forskning. (1968).
- LIX. *Arne Jakobsson*: Omflyttningen i Sverige 1950—1960. (1969).
- LX. *Åke Hillefors*: Västsveriges glaciala historia och morfologi. (1969). Out of print.

- LXI. *Sven Lindqvist*: Bebyggelseklimatiska studier. (1970).
- LXII. *Torsten Hägerstrand, Gunnar Törnqvist m fl*: Urbaniseringen i Sverige. (SOU 1970: 14).
- LXIII. *Bengt Sahlberg*: Interregionala kontaktmönster. Personkontakter inom svenskt näringsliv — en flygpassagerarstudie. (1970).
- LXIV. *Björn Hedberg*: Kontaktsystem inom svenskt näringsliv. En studie av organisationers externa personkontakter. (1970).
- LXV. *Mats G Engström*: Regional arbetsfördelning. Nya drag i förvärvsarbets geografiska organisation i Sverige. (1970).
- LXVI. *Torsten Persson*: Geomorphological Studies in the South-Swedish Highlands. (1972).
- LXVII. *Dewitt Davis Jr*: A factorial ecology of Malmö 1965. The social geography of a city. (1972). Out of print.
- LXVIII. *Zoltan Petery*: Studier i svensk regionplanering. Regionplanering enligt byggnadslagen i mindre regioner. (1972). Out of print.
- LXIX. *Tommy Book*: Stadsplan och järnväg i Norden. (1974).
- LXX. *Hans Abrahamson*: Studier i jordbrukets omstrukturering. (1974).
- LXXI. *Christer Persson*: Kontaktarbete och framtida lokaliseringsförändringar. (1974).
- LXXII. *Ulf Helldén*: Karst. En studie av Artfjällets karstområde samt jämförande korrosionsanalyser från Västspetsbergen och Tjeckoslovakien. (1974).
- LXXIII. *János Szegő*: Befolkningstäthet, markanvändning, planering. (vol 1 o. 2) (1974).
- LXXIV. *Raúl Niño Guerrero*: Rural to Urban Drift of the Unemployed in Colombia. (1975).
- LXXV. *Ulf Erlandsson*: Företagsutveckling och utrymmesbehov. (1975).
- LXXVI. *Sture Öberg*: Methods of Describing Physical Access to Supply Points. (1976).
- LXXVII. *Bo Lenntorp*: Paths in Space-time Environments. A time-geographic Study of Movement Possibilities of Individuals. (1976).
- LXXVIII. *Richard Åhman*: Palsar i Nordnorge. En studie av palsars morfologi, utbredning och klimatiska förutsättningar i Finnmarks och Troms fylke. (1977).
- LXXIX. *Björn Gyllström*: The Organization of Production as a Space-Modelling Mechanism in Underdeveloped Countries. (1977).
- LXXX. *Anders Järnegen—Fosco Ventura*: Tre samhällens förändringshistoria. Exploateringen av den fysiska miljön i historisk belysning. (1977).
- LXXXI. *Tommy Book*: Stadsplan och järnväg i Storbritannien och Tyskland. (1978).
- LXXXII. *Jan O Mattsson—Leif Börjesson*: Lokalklimatiska temperaturstudier inom ett skånskt fruktodlingsdistrikt med särskilt beaktande av frost-läntheten. (1978).
- LXXXIII. *Bjørn Terje Asheim*: Regionale ulikheter i levekår. (1979).
- LXXXIV. *Solveig Mårtensson*: On the Formation of Biographies in Space-Time Environments. (1979).
- LXXXV. *Erik Wallin*: Vardagslivets generativa grammatik - Vid gränsen mellan natur och kul-tur. (1980).
- LXXXVI. *Reinhold Castensson*: Välja för framtid - om markanvändningsval och förtroendemannainflytande i kommunal planering. (1980).
- LXXXVII. *Kerstin Montal*: Industri och vatten. Den vattenförorenande industrins lokaliseringsproblem i Malmöhus län. (1980).
- LXXXVIII. *Tommy Carlstein*: Time Resources, Society and Ecology. (1980).
- LXXXIX. *Jonas Åkerman*: Studies on periglacial geomorphology in West Spitsbergen. (1980).
- XC. *Leif Engh*: Karstområdet vid Lummelunds bruk, Gotland, med speciell hänsyn till Lummelundagrottan. (1980).